

Камчатский государственный технический университет

А. Исаков

# Физика

ЕГЭ - 2016

Часть -1

Петропавловск-Камчатский 2015

**государственный технический университет**

**А. Исаков**

# **Физика**

**Решение задач ЕГЭ – 2016  
Часть 1**

---

**Петропавловск-Камчатский  
2015**

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 – 2016. Часть 1: КамчатГТУ, 2016. – 317 с.

Приведены решения тематических тестовых заданий, составленных Н.К. Ханнановым, Г.Г. Никифоровым, В.А. Орловым. По мнению составителей, задания соответствуют в полной мере объёму и тематике ЕГЭ по физике в 2016 г., отражая все внесённые идеологами ЕГЭ актуальные изменения в сравнении с предыдущими годами.

Большинство задач снабжены подробными решениями с анализом применяемых законов и определений, для стандартных задач самого начального уровня приведены только схемы решений

Сборник предназначен, прежде всего, для школьников старших классов, намеревающихся овладеть методиками решения задач в рамках современного ЕГЭ.

## Оглавление

### 1. Механика

1.1. Кинематика .....	4
1.2. Динамика .....	20
1.3. Импульс. Энергия. Работа. Мощность .....	35
1.4. Статика и гидростатика .....	47
1.5. Колебания и волны .....	57

### 2. Молекулярная физика. Термодинамика

2.1. Молекулярное строение вещества .....	70
2.2. Идеальный газ. Изопроцессы .....	80
2.3. Термодинамика .....	87
2.4. Агрегатное строение вещества .....	106

### 3. Электродинамика

3.1. Закон Кулона. Напряжённость электрического поля .....	120
3.2. Потенциал поля. Энергия электрического поля .....	137
3.3. Законы постоянного тока .....	152
3.4. Токи в различных средах .....	164
3.5. Магнитное поле .....	169
3.6. Явление электромагнитной индукции .....	176
3.7. Электромагнитные колебания и волны .....	189

### 4. Оптика

4.1. Геометрическая оптика .....	212
4.2. Волновая оптика .....	227

### 5. Основы специальной теории относительности

5.1. Специальная теория относительности .....	239
---	-----

### 6. Квантовая физика

6.1. Фотонная теория света .....	250
6.2. Боровская модель атома .....	263
6.3. Физика атомного ядра .....	280

### 7. Методы научного познания. Физическая картина Мира

7.1. Методы познания в физике .....	298
-------------------------------------	-----



# 1. Механика

## 1.1. Кинематика

### Механическое движение и его относительность. Система отсчёта

**A1.** Эскалатор метро поднимается со скоростью 2 м/с. Может ли человек, находящийся на нем, быть в покое в системе отсчета, связанной с Землей?

- 1) может, если движется по эскалатору в противоположную сторону со скоростью 2 м/с
- 2) может, если движется в ту же сторону со скоростью 2 м/с
- 3) может, если стоит на эскалаторе
- 4) не может ни при каких условиях

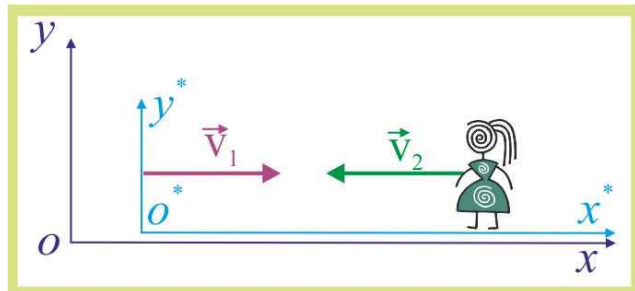
#### Решение

1. Свяжем подвижную систему координат (ПСК) с эскалатором, движущимся с постоянной скоростью  $\vec{v}_1$ . Если пассажир станет двигаться по эскалатору со скоростью  $\vec{v}_2$  в противоположном направлении, то относительно неподвижной системы координат (НСК) будет находиться в относительном покое. Другими словами, если пассажир будет двигаться по эскалатору со скоростью 2 м/с относительно ПСК, то его скорость относительно НСК будет равна нулю

$$\vec{v}_{1,2} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 = 0;$$

или в скалярной форме:

$$|\vec{v}_{1,2}| = v_1 - v_2 = 0;$$



**A2.** Лодка должна попасть на противоположный берег по кратчайшему пути (в системе отсчета, связанной с берегом). Модуль скорости течения реки  $u$ , а модуль скорости лодки относительно воды  $v > u$ . Модуль скорости лодки относительно берега должен быть равен

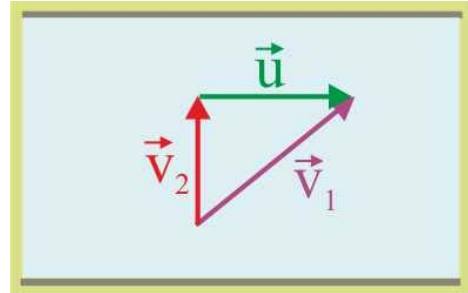
- 1)  $v + u$       2)  $v - u$       3)  $\sqrt{v^2 - u^2}$       4)  $\sqrt{v^2 + u^2}$

#### Решение

1. Обозначим:  $\vec{u}$  – скорость течения реки,  $\vec{v}_1$  – скорость лодки относительно воды,  $\vec{v}_2$  – искомая скорость лодки относительно берега.

2. Построим прямоугольный треугольник скоростей :

в котором вектор скорости лодки относительно воды будет являться гипотенузой, а векторы скоростей течения реки и скорости лодки относительно берега (относительно неподвижной системы координат) – катетами. Из построения видно, что скорость лодки относительно воды определяется в виде геометрической суммы скоростей лодки относительно воды и течения реки.



2. Используя теорему Пифагора, получим:

$$|\vec{v}_2| = \sqrt{v_1^2 - u^2};$$

**А3.** Координата тела меняется с течением времени согласно формуле  $x = 10 - 4t$  в единицах СИ. Чему равна координата этого тела через 5 с после начала движения?

- 1) -20 м      2) -10 м      3) 10 м      4) 30 м

### Решение

1. Тело начинает движение при начальной координате  $x_0 = 10$  м и перемещается в направлении, противоположном оси  $ox$ , координата тела в заданный момент времени определится как:

$$x_t = 10 - 4 \cdot 5 = -10 \text{ м};$$

точка через 5с после начала движения окажется левее начала системы отсчёта в отрицательной области значений координат.

**А4.** Тело, двигаясь прямолинейно и равномерно в плоскости, перемещается из точки  $A$  с координатами  $(1; 2)$  в точку  $B$  с координатами  $(4; -1)$  за время, равное 10 с. Скорость тела направлена к оси  $Ox$  под углом

### Решение

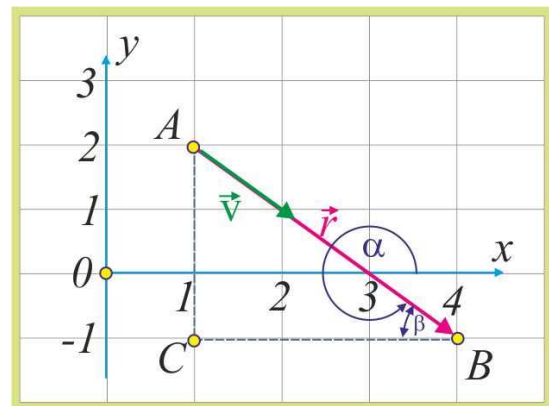
1. Модуль перемещения тела за заданное время:

$$|\vec{r}| = \sqrt{AC^2 + CB^2} = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4,24 \text{ м};$$

2. Ввиду прямолинейности движения, направление вектора скорости тела и направление вектора перемещения совпадают.

3. Угол  $(\vec{x}; \vec{v}) = \alpha$  отсчитывается против часовой стрелки, поэтому:

$$\alpha = 360^\circ - \beta; \quad \beta = \arccos \frac{3}{4,24} \approx 45^\circ; \quad \Rightarrow \quad \alpha \approx 315^\circ;$$



## Материальная точка. Траектория. Путь. Перемещение

**А5.** Исследуется перемещение слона и мухи. Модель материальной точки может использоваться для описания движения

- 1) только слона
- 2) только мухи
- 3) и слона, и мухи в разных исследованиях
- 4) ни слона, ни мухи, поскольку это живые существа

### Решение

1. Материальной точкой принято считать некий физический объект, обладающий массой и не занимающий объёма. В природе таких объектов не существует, но введение такой модели (абстракции) позволяет в ряде случаев упрощать анализ движения. Как правило, модель материальной точки наиболее целесообразна при исследовании прямолинейных движений, когда размеры объектов существенно меньше перемещений, совершаемых телами.

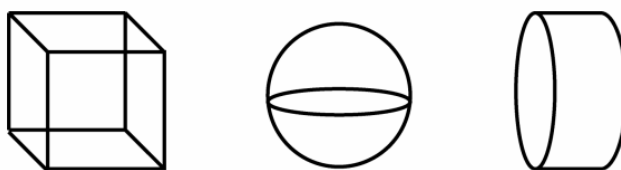
2. Модель материальной точки не корректна при наличии вращательной составляющей в движении.

3. В данном случае модель материальной точки может быть применена как при исследовании движения слона так и при исследовании движения мухи в тех случаях когда все части столь разных по масштабу живых организмов движутся по одинаковым траекториям.

**А6.** На рисунке показаны три симметричных тела одинаковой массы  $m$  (куб I, шар II и цилиндр III). Для каких двух тел при расчете силы можно применить формулу

$$F = \frac{Gm^2}{R^2}, \text{ где } G \text{ — гравитационная постоянная. Расстояние}$$

$R$  между центрами тел сравнимо с размерами самих тел.



### Решение

1. Приведенная форма закона тяготения применима в случае, когда расстояние между взаимодействующими телами во много раз больше их собственных размеров, т.е. взаимодействующие тела можно считать материальными точками, в которых сосредоточена вся масса тел.

2. В случае, когда размеры тел соизмеримы с расстоянием между ними для применения этой формулы необходимо тела разбить на множество элементарных объёмов и найти гравитационное взаимодействие каждой элементарной массы одного тела с элементарными массами другого тела, а затем результаты просуммировать:

$$\vec{F} = \sum_{k=1}^{k=N} \sum_{\chi=1}^{\chi=Z} G \frac{\Delta m_k \Delta m_{\chi}}{r_{k\chi}^3} \vec{r}_{k\chi};$$

**A7.** Координаты материальной точки, движущейся в плоскости, изменяются в зависимости от времени по закону

$$X(t) = at + b;$$

$$Y(t) = ct + d,$$

где  $a, b, c$  — числа, не равные нулю.

Траектория точки выражается уравнением

1)  $y = ax + d$

2)  $y = cx + d$

3)  $y = (a + c)x + (b + d)$

4)  $y = \frac{c}{a}x + \frac{ad - bc}{a}$

### Решение

1. По условию задачи известны уравнения движения. Чтобы получить уравнение траектории движения материальной точки необходимо из уравнений движения исключить параметр – время, например, выразив  $t$  из первого уравнения и подставив полученное значение во второе заданное уравнение:

$$t = \frac{x - b}{a}; \quad y = c \frac{x - b}{a} + d; \quad \Rightarrow \quad y = \frac{c}{a}x + \frac{ad - bc}{a};$$

2. Точка движется по прямолинейной траектории, описываемой уравнением:

$$y = kx + B; \quad \text{где} \quad k = \frac{c}{a}; \quad B = \frac{ad - bc}{a};$$

---

**A8.** Человек обошел круглое озеро диаметром 1 км. О пути, пройденном человеком, и модуле его перемещения можно утверждать, что

1) путь равен 3,14 км, модуль перемещения равен 1 км

2) путь равен 3,14 км, модуль перемещения равен нулю

3) путь равен нулю, модуль перемещения равен нулю

4) путь равен нулю, модуль перемещения равен 3,14 км

### Решение

1. Перемещением называется кратчайшее направленное расстояние между начальной и конечной точками движения, т.е. при обходе круглого озера модуль вектора перемещения будет равен нулю, точка старта совпадает с конечной точкой движения.

2. Путь в данном случае равен длине окружности:

$$s = 2\pi R = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 = 3,14 \text{ км};$$

---

**A9.** Тело движется вдоль оси  $OX$ . Проекция его скорости  $v_x(t)$  меняется по закону, приведенному на графике.

Путь, пройденный телом за 1 с, равен

1) 0,25 м

2) 0,5 м

3) 1 м

4) 2 м

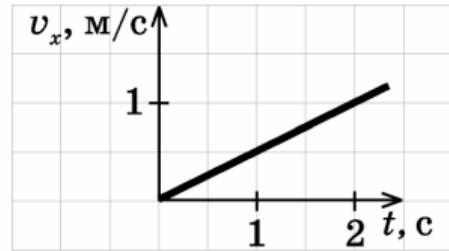
### Решение

1. По заданному графику зависимости проекции скорости от времени, ускорения движения равно:

$$\langle a_x \rangle = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

2. Уравнение равноускоренного прямолинейного движения при  $v_0 = 0$ :

$$x(t) = \frac{a_x \tau^2}{2} = \frac{0,5 \cdot 1}{2} = 0,25 \text{ м};$$



**В1.** Человек совершает пробежки вокруг озера с примерно одинаковой скоростью. В первый день он обогает озеро один раз, а во второй день — два раза. Как изменятся при этом следующие величины: пройденный путь, перемещение за время пробежки?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится      2) уменьшится      3) не изменится

### Решение

1. Модуль перемещения в первом и втором случае будет одинаковым и равным нулю. Путь во втором случае будет в два раза больше, т.е. увеличится

Пройденный путь	Перемещение за время пробежки
<b>1</b>	<b>3</b>

**А10.** Точка совершает один оборот по окружности радиусом 2 м. В момент времени, когда ее перемещение равно диаметру, пройденный точкой путь равен

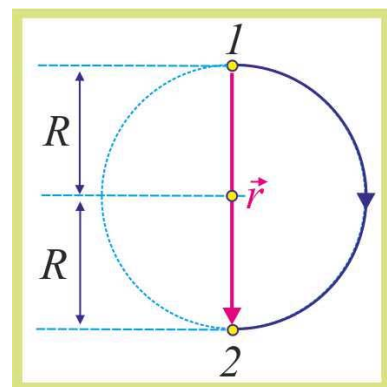
- 1) 2 м      2) 4 м      3) 6,28 м      4) 12,56 м

### Решение

1. Путь, пройденный точкой при модуле перемещения равном диаметру окружности, определится как:

$$|\vec{r}| = 2R; \quad s_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{2} 2\pi R = \pi R;$$

$$s_{1 \rightarrow 2} = 3,14 \cdot 2 = 6,28 \text{ м};$$





## Скорость. Прямолинейное равномерное движение

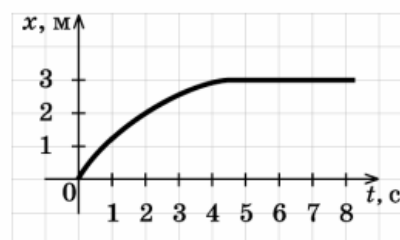
- A11.** Два автомобиля движутся по прямой дороге в одном направлении: один со скоростью 40 км/ч, а другой — со скоростью 50 км/ч. При этом они
- 1) сближаются
  - 2) удаляются
  - 3) не изменяют расстояние друг от друга
  - 4) могут сближаться, а могут и удаляться

### Решение

1. Всё зависит от того, какой из автомобилей движется первым. Если первым идёт автомобиль со скоростью  $v_2 = 50$  км/ч, а вторым автомобиль с  $v_1 = 40$  км/ч, то автомобили будут удаляться друг от друга, а вот если — наоборот, "тихий" автомобиль движется первым, то "быстрый" автомобиль, в конце концов, нагонит "тихий" и перегонит его. В этом случае автомобили вначале будут сближаться, а потом удаляться друг от друга.

- A12.** На рисунке изображен график изменения координаты тела с течением времени. Как изменялась скорость в промежуток времени от 0 до 5 с?

- 1) не изменялась
- 2) увеличивалась
- 3) уменьшалась
- 4) для ответа на вопрос не хватает данных

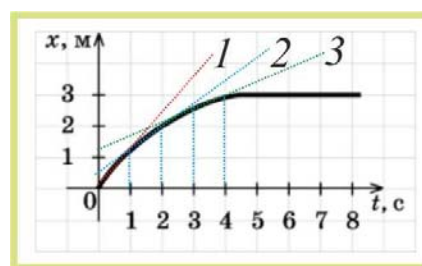


### Решение

1. При  $t > 4$  с координаты тела не изменяются, т.е. тело останавливается, его скорость стала равной нулю, другими словами, судя по заданному графику, скорость тела в заданном промежутке времени уменьшается.

2. Модуль средней скорости за данный промежуток времени равен отношению изменения координаты тела к величине промежутка:

$$v_i = \frac{\Delta x_i}{\Delta t_i}; \quad \Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3; \quad \Delta x_1 > \Delta x_2 > \Delta x_3; \quad \Rightarrow \quad v_1 > v_2 > v_3;$$



- A13.** На рисунке показан график движения тела. Определите значение его координаты и скорости движения в момент времени 5 с.

- 1) 4 м; 1,6 м/с
- 2) 12 м; 2,4 м/с
- 3) 12 м; 1,6 м/с
- 4) 4 м; 2,4 м/с

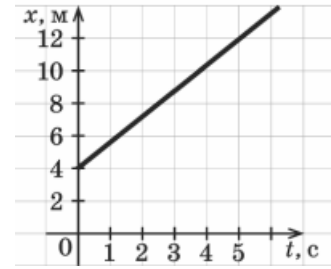
### Решение

1. Так как зависимость  $x(t)$  линейная, то модуль скорости в течение всего времени движения тела постоянен:

$$|\vec{v}| = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{12 - 4}{5} = 1,6 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2. Уравнение движения тела:

$$x(t) = x_0 + vt; \Rightarrow x_\tau = x_0 + v\tau = 4 + 1,6 \cdot 5 = 12 \text{ м};$$



**A14.** Тело, двигаясь прямолинейно и равномерно в плоскости, перемещается из точки  $A$  с координатами  $(0 \text{ м}; 2 \text{ м})$  в точку  $B$  с координатами  $(4 \text{ м}; -1 \text{ м})$  за время, равное  $10 \text{ с}$ . Модуль скорости тела равен

- 1)  $0,3 \text{ м/с}$       2)  $0,5 \text{ м/с}$       3)  $0,7 \text{ м/с}$       4)  $2,5 \text{ м/с}$

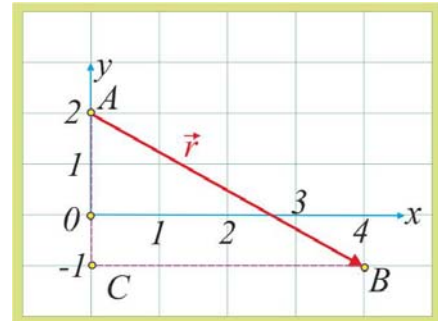
### Решение

1. Модуль перемещения тела из прямоугольного треугольника  $ABC$ :

$$|\vec{r}| = \sqrt{AC^2 + CB^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \text{ м};$$

2. Модуль скорости тела за время  $\tau = 10 \text{ с}$ :

$$|\vec{v}| = \frac{|\vec{r}|}{\tau} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$



### Ускорение

**A15.** Автомобиль движется по прямому шоссе с постоянной скоростью и начинает тормозить. Проекция ускорения на ось, направленную по вектору начальной скорости автомобиля

- 1) отрицательна  
2) положительна  
3) равна нулю  
4) может быть любой по знаку

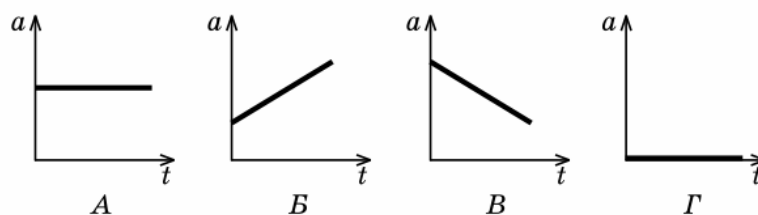
### Решение

1. Проекция ускорения на ось, совпадающую по направлению с направлением вектора начальной скорости:

$$a_x = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_{x(2)} - v_{x(1)}}{\Delta t}; \quad v_{x(1)} > v_{x(2)};$$

проекция ускорения на ось, направленную по вектору начальной скорости отрицательна.

**A16.** На рисунке изображены графики зависимости ускорения от времени для разных видов движения. Какой из графиков соответствует равномерному движению?



**Решение**

1. При равномерном движении за равные промежутки времени проходятся равные расстояния, т.е.  $v = \text{const}$ ;  $a = 0$ , следовательно, заданной ситуации соответствует график Г.

---

**A17.** Пешеход и велосипедист одновременно начинают равноускоренно двигаться из состояния покоя. Ускорение велосипедиста в 2 раза больше, чем у пешехода. Велосипедист достиг скорости  $v$  за некоторое время  $t$ . Чтобы достичь такой же скорости, пешеходу понадобится время, равное

**Решение**

1. Уравнения скоростей пешехода и велосипедиста:

$$\left. \begin{array}{l} v_1 = at_1; \\ v_2 = 2at_2; \end{array} \right\} v_1 = v_2; \Rightarrow at_1 = 2at_2; \Rightarrow t_1 = 2t_2,$$

пешеходу потребуется в два раза большее время.

---

**B2.** Ускорение лыжника на одном из спусков трассы равно  $2,4 \text{ м/с}^2$ . На этом спуске его скорость увеличивается на  $36 \text{ м/с}$ . Чему равно время, затраченное лыжником на спуск?

**Решение**

1. Ускорение характеризует изменение скорости лыжника во времени, поэтому для усреднённых значений величин можно записать:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}; \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta v}{a} = \frac{36}{2,4} = 15\text{с};$$


---

## Прямолинейное равноускоренное движение

**В3.** Автомобиль, двигающийся со скоростью  $v_0$ , начинает тормозить и останавливается через время  $t$ , двигаясь равноускоренно. Чему равны тормозной путь автомобиля и путь, пройденный за время  $t/2$ ?

Установите соответствие между физическими величинами и формулами, по которым их можно рассчитать. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные буквы под соответствующими цифрами.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ФОРМУЛА
А) тормозной путь	1) $v_0 t$
Б) путь, пройденный от начала торможения за время $t/2$	2) $\frac{v_0 t}{2}$
	3) $\frac{v_0 t}{4}$
	4) $\frac{3v_0 t}{8}$

### Решение

1. Уравнения движения автомобиля:

$$\left. \begin{array}{l} v(t) = v_0 - at; \\ x(t) = v_0 t - \frac{at^2}{2}; \end{array} \right\} v(t) = 0; \Rightarrow t_T = \frac{v_0}{a}; \quad a = \frac{v_0}{t_T},$$

где  $t_T$  – время торможения.

2. Тормозной путь автомобиля:

$$x_T = v_0 \frac{v_0}{a} - \frac{a v_0^2}{2 a^2} = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0 t_T}{2};$$

3. Путь, пройденный автомобилем за время  $\tau = t_T/2$

$$x_\tau = v_0 \frac{t_T}{2} - \frac{v_0}{2t_T} \frac{t_T^2}{4} = \frac{4v_0 t_T - v_0 t_T}{8} = \frac{3v_0 t_T}{8};$$

**A18.** Равноускоренному движению соответствует график зависимости модуля скорости от времени, обозначенный на рисунке цифрой

- 1) 1      2) 3      3) 2 и 4      4) 4

### Решение

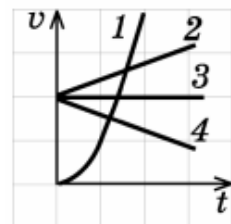
1. Уравнение, описывающее зависимость скорости от времени при равноускоренном движении:

$$v(t) = v_0 \pm at,$$

что соответствует прямому виду:

$$y = b \pm kx;$$

2. Указанным условиям соответствуют графики 2 и 4.



**A19.** Зависимость координаты от времени для некоторого тела описывается уравнением  $x = Bt + Ct^2$ , где  $B = 12$  м/с,  $C = -2$  м/с<sup>2</sup>. В какой момент времени проекция скорости тела на ось равна нулю?

- 1) 6 с                      2) 3 с                      3) 2 с                      4) 0 с

**Решение**

1. По условию задачи задано уравнение скорости, т.е. зависимость координаты от времени. Чтобы получить из него уравнение скорости необходимо продифференцировать его по времени, т.к. скорость представляет первую производную по времени уравнения движения:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = B + 2Ct, \quad v_x = v_0 + at; \quad v_x = 12 - 4t;$$

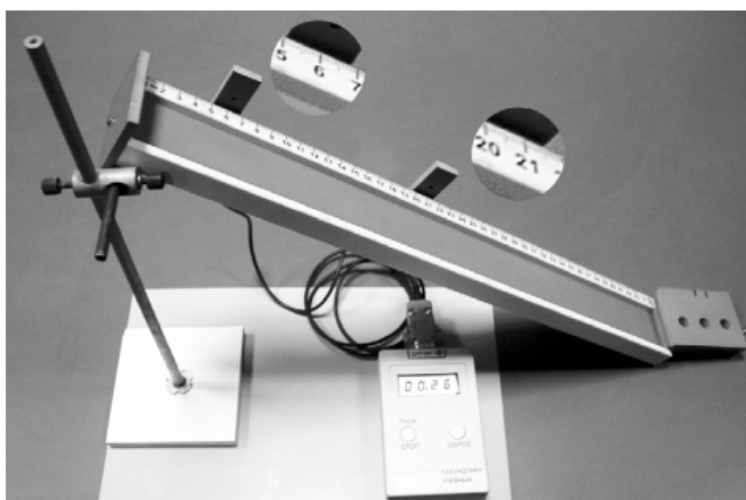
2. Время, при котором проекция скорости тела на заданную ось станет равна нулю:

$$v_x = 0; \Rightarrow 12 = 4t; \quad t = 3\text{с};$$

**A20.** Для исследования скольжения каретки по наклонной плоскости ученик собрал установку (см. рис.), в которой время измеряется электронным секундомером (лежит внизу). Включение и выключение секундомера происходит двумя датчиками положения, установленными на краю скамьи и срабатывающими в момент прохождения мимо них магнита, впрысванного в брусок, скользящий по скамье. На рисунке выносками показано, на каком расстоянии от начала скамьи закреплены датчики, управляющие секундомером.

Чему равно ускорение движения бруска по наклонной плоскости?

- 1) 1,7 м/с<sup>2</sup>            2) 2,2 м/с<sup>2</sup>            3) 4,4 м/с<sup>2</sup>            4) 6,2 м/с<sup>2</sup>



**Решение**



1. Приближённо искомую величину можно получить, пренебрегая начальной скоростью при прохождении брусом начальной точки отсчёта:

$$s \approx \frac{a\tau^2}{2}; \Rightarrow a \approx \frac{2s}{\tau^2}; \quad s \approx 0,15\text{м}; \quad \tau = 0,26\text{с}; \Rightarrow a \approx \frac{0,3}{0,068} \approx 4,44 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$


---

**A21.** Гору длиной 50 м лыжник прошёл за 10 с, двигаясь с ускорением 0,4 м/с<sup>2</sup>. Чему равна скорость лыжника в начале и в конце горы?

- 1) 3 м/с и 6 м/с
- 2) 4 м/с и 7 м/с
- 3) 2 м/с и 8 м/с
- 4) 3 м/с и 7 м/с

#### Решение

1. Начальная скорость лыжника при начале спуска с горы:

$$\ell = v_0\tau + \frac{a\tau^2}{2}; \Rightarrow v_0 = \frac{\ell}{\tau} - \frac{a\tau}{2} = \frac{50}{10} - \frac{0,4 \cdot 10}{2} = 3 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2. Конечная скорость лыжника:

$$v = v_0 + a\tau = 3 + 0,4 \cdot 10 = 7 \text{ м/с};$$


---

**B4.** За 2,5 с прямолинейного равноускоренного движения тело прошло 40 м, увеличив свою скорость в 3 раза. Определите начальную скорость тела.

#### Решение

1. Кинематическая система уравнений, удовлетворяющих заданному движению:

$$\left. \begin{array}{l} 3v_0 = v_0 + a\tau; \\ \ell = v_0t + \frac{a\tau^2}{2}; \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} a = \frac{2v_0}{\tau}; \\ \ell = v_0\tau + \frac{2v_0}{2\tau}\tau^2; \end{array} \right\} \Rightarrow \ell = 2v_0\tau; \Rightarrow v_0 = \frac{\ell}{2\tau} = 8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$


---

### Свободное падение

**A22.** В трубке, из которой откачан воздух, на одной и той же высоте находятся дробинка, пробка и птичье перо. Какое из этих тел раньше всех достигнет дна трубки при свободном падении с одной высоты?

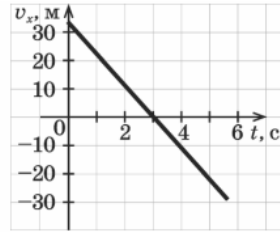
- 1) дробинка
- 2) пробка
- 3) птичье перо
- 4) все три тела достигнут дна трубки одновременно

#### Решение

1. В отсутствие сопротивления со стороны воздуха все три тела будут двигаться к поверхности земли с одинаковыми ускорениями  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ , другими словами все три тела дна трубки достигнут одновременно.

---

**A23.** Стрела пущена вертикально вверх с поверхности Земли. Проекция ее скорости на вертикальную ось  $Ox$  меняется со временем согласно графику на рисунке. Через сколько секунд стрела упадет на Землю?



- 1) 1,5 с      2) 3 с      3) 4,5 с      4) 6 с

### Решение

1. Ускорение стрелы по заданному графику:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \approx \frac{30}{3} \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \approx g,$$

стрела движется без сопротивления, её ускорение при подъёме и падении равно ускорению свободного падения.

2. Время нахождения стрелы в воздухе с учётом равенства времени подъёма  $\tau_1$  и спуска  $\tau_2$ :

$$v = v_0 + g\tau_1; \quad v = 0; \quad \Rightarrow \quad \tau_1 = \frac{v_0}{g} = 3\text{с}; \quad \tau = 2\tau_1 = 6\text{с};$$

**A24.** Камень свободно падает с некоторой высоты  $H$  с начальной скоростью, равной нулю. Сопротивление воздуха мало. Скорость, которую приобретает камень, пропорциональна

- 1)  $H^2$       2)  $\frac{1}{H}$       3)  $\sqrt{H}$       4)  $H$

### Решение

1. Система уравнений, описывающих падение тела из состояния покоя без сопротивления со стороны воздуха:

$$\left. \begin{array}{l} v = gt; \\ H = \frac{gt^2}{2}; \end{array} \right\} \Rightarrow t = \sqrt{\frac{2H}{g}}; \Rightarrow v = \sqrt{2gH}; \quad v \sim \sqrt{H};$$

**A25.** Камень, брошенный вертикально вверх с поверхности Земли со скоростью 30 м/с, упал обратно на Землю. Сопротивление воздуха мало. Камень находился в полете примерно

- 1) 1,5 с      2) 3 с      3) 4,5 с      4) 6 с

### Решение

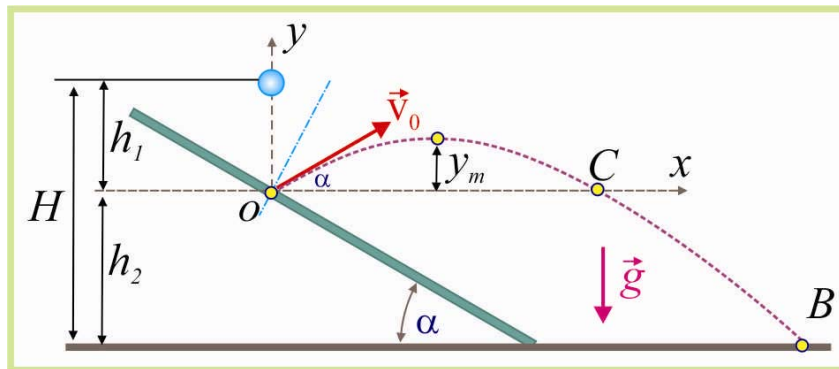
1. В отсутствии сопротивления движению со стороны воздуха время подъёма камня в верхнюю точку его траектории  $\tau_1$  будет равно времени падения  $\tau_2$ .

2. Уравнения подъёма камня:

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 - g\tau_1; \\ H &= \frac{g\tau_1^2}{2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \tau_1 = \frac{v_0}{g} = 3\text{с}; \Rightarrow \tau = \tau_1 + \tau_2 = 6\text{с};$$

**С1.** С высоты  $H = 20$  м свободно падает стальной шарик. Через  $t = 1$  с после начала падения он сталкивается с неподвижной плитой, плоскость которой наклонена под углом  $30^\circ$  к горизонту. На какую высоту  $h$  над поверхностью Земли поднимется шарик после удара? Удар шарика о плиту считать абсолютно упругим. Сопротивление воздуха мало.

### Решение



1. Высота шарика над плитой в момент начала падения:

$$h_2 = H - h_1 = H - \frac{gt^2}{2} = 20 - 5 = 15\text{м};$$

2. Проекция скорости шарика после отскока на вертикальную ось:

$$v_0 = gt \sin \alpha = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

3. Максимальная высота подъёма шарика  $y_m$ , как тела брошенного под углом к горизонту:

$$y_m = \frac{v_0^2 \sin \alpha}{g} = \frac{25 \cdot 0,5}{10} = 1,25\text{м};$$

4. Высота подъёма шарика после отскока над уровнем поверхности земли:

$$h = h_2 + y_m = 16,25\text{м};$$

### Движение точки по окружности с постоянной по модулю скоростью

**А26.** К боковой поверхности цилиндра, вращающегося вокруг своей оси, прижимают второй цилиндр с осью, параллельной оси первого, и радиусом, вдвое превосходящим радиус первого. При совместном вращении двух цилиндров без проскальзывания у них совпадают

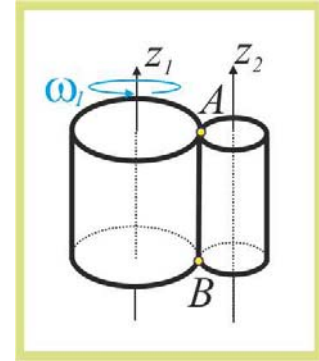
- 1) периоды вращения
- 2) частоты вращения
- 3) линейные скорости точек на поверхности
- 4) центростремительные ускорения точек на поверхности

### Решение

1. Линия, по которой в данный момент времени соприкасаются без проскальзывания цилиндрические поверхности, является для них общей, поэтому линейные скорости точек, лежащих на поверхности будут одинаковыми. Периоды, угловые скорости и нормальные (центростремительные) ускорения будут разными:

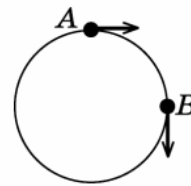
$$R_2 = 2R_1; \quad v_1 = \omega_1 R_1 = v_2 = 2\omega_2 R_1; \quad \omega_1 = 2\omega_2;$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega}; \quad 2\pi v = \omega; \quad \Rightarrow \quad T_1 \neq T_2; \quad v_1 \neq v_2;$$



**A27.** При равномерном движении по окружности модуль вектора изменения скорости при перемещении из точки *A* в точку *B* (см. рис.) равен

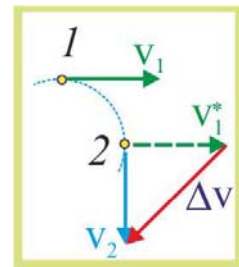
- 1) 0      2)  $v\sqrt{2}$       3)  $2v$       4)  $v$



### Решение

1. Любое криволинейное движение, включая движение по круговой траектории является ускоренным. В данном случае нормальное ускорение возникает вследствие изменения направления вектора скорости:

$$\Delta \vec{v} = v_1 - v_2; \quad |\Delta \vec{v}| = \sqrt{v^2 + v^2} = v\sqrt{2};$$



**A28.** Период обращения тела, движущегося равномерно по окружности, увеличился в 2 раза. Частота обращения

- 1) возросла в 2 раза  
2) уменьшилась в 2 раза  
3) возросла в 4 раза  
4) уменьшилась в 4 раза

### Решение

1. Период вращения обратно пропорционален частоте вращения:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{\nu_1}; \\ 2T_1 &= \frac{1}{\nu_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow 2 = \nu_2 = 2\nu_1;$$

**A29.** Период обращения Земли вокруг Солнца равен одному году, радиус орбиты Земли равен 150 млн км. Скорость движения Земли по орбите равна примерно

- 1) 30 м/с  
2) 30 км/с  
3) 150 км/с  
4) 1800 км/с

## Решение

1. Угловая скорость Земли при её вращении по круговой траектории вокруг Солнца:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad T = 365 \text{ суток} = 8,76 \cdot 10^3 \text{ ч} = 5,256 \cdot 10^5 \text{ мин} = 3,154 \cdot 10^7 \text{ с};$$

$$\omega = \frac{6,28}{3,154 \cdot 10^7} \approx 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

1. Линейная скорость Земли в соответствии с теоремой Леонарда Эйлера:

$$v = \omega R \approx 1,5 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^7 \approx 30 \frac{\text{км}}{\text{с}};$$

## Нормальное (центростремительное) ускорение

**А30.** Вектор ускорения при равномерном движении точки по окружности

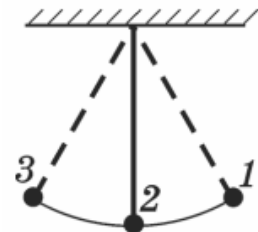
- 1) постоянен по модулю и по направлению
- 2) равен нулю
- 3) постоянен по модулю, но непрерывно изменяется по направлению
- 4) постоянен по направлению, но непрерывно изменяется по модулю

## Решение

1. При вращательном равномерном движении точки по круговой траектории, при фиксированном значении расстояния до оси вращения нормальное (центростремительное) ускорение изменяется по направлению и постоянно по модулю.

**А31.** Груз на нити совершает свободные колебания между точками 1 и 3. В каком положении равнодействующая сил, действующих на груз, равна нулю?

- 1) только в точке 2
- 2) в точках 1 и 3
- 3) в точках 1, 2, 3
- 4) ни в одной точке



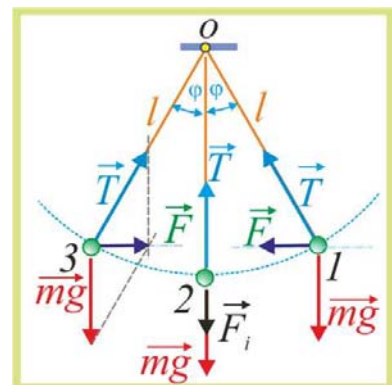
## Решение

1. Условие:

$$\sum_{k=1}^{k=n} \vec{F}_k = 0;$$

в данной ситуации не наблюдается.

2. В крайних точках круговой траектории 1 и 3 на груз действует Результирующая сила  $\vec{F} = m\vec{g} + \vec{T}$ , в положении статического равновесия 2, когда скорость груза максимальна, действует, так называемая сила





инерции, обусловленная возникновением нормального (центростремительного) ускорения  $\vec{a}_n$

$$|\vec{F}_i| = ma_n; \quad |\vec{a}_n| = \frac{v^2}{\ell}; \quad |\vec{F}_i| = \frac{mv^2}{\ell};$$

---

**A32.** Два спутника движутся по разным круговым орбитам вокруг Земли. Скорость первого из них в 2 раза больше, а радиус орбиты в 4 раза меньше, чем второго. Центростремительное ускорение первого спутника  $a_1$ , второго —  $a_2$ ? Чему равно отношение  $\frac{a_1}{a_2}$ ?

- 1) 1                      2) 2                      3) 4                      4) 16

**Решение**

$$a_1 = \frac{4 \cdot 4v^2}{r}; \quad a_2 = \frac{v^2}{r}; \quad \left. \vphantom{a_1} \right\} \Rightarrow \frac{a_1}{a_2} = 16;$$

---

**B5.** Рассчитайте центростремительное ускорение льва, спящего на экваторе, в системе отсчета, две оси координат которой лежат в плоскости экватора и направлены на неподвижные звезды, а начало совпадает с центром Земли. Ответ округлите до тысячных.

**Решение**

$$R \approx 6400 \text{ км} \approx 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}; \quad T = 24 \text{ ч} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ с};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \approx \frac{6,28}{8,64 \cdot 10^4} \approx 7,27 \cdot 10^{-5} \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} = \frac{\omega^2 R^2}{R} = \omega^2 R \approx 5,28 \cdot 10^{-9} \cdot 6,4 \cdot 10^6 \approx 3,38 \cdot 10^{-2} \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \approx 0,03 \frac{\text{М}}{\text{с}^2};$$

---

## 1.2. Динамика

### Взаимодействие тел. Сила. Принцип суперпозиции

- В1.** Установите соответствие между физическими величинами и приборами для их измерения. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.

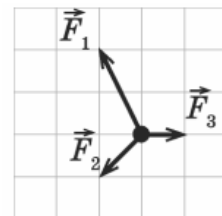
ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ПРИБОР ДЛЯ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ
А) сила	1) спидометр
Б) скорость	2) манометр
	3) метр
	4) динамометр

#### Решение

Физическая величина	Прибор для её измерения
Сила	Динамометр
Скорость	Спидометр

- А1.** На покоящееся тело начинают действовать три силы, изображенные на рисунке. Куда начнет двигаться тело?

- 1) ←      2) ↑      3) →      4) ↙



#### Решение

1. В соответствии со вторым законом Ньютона:

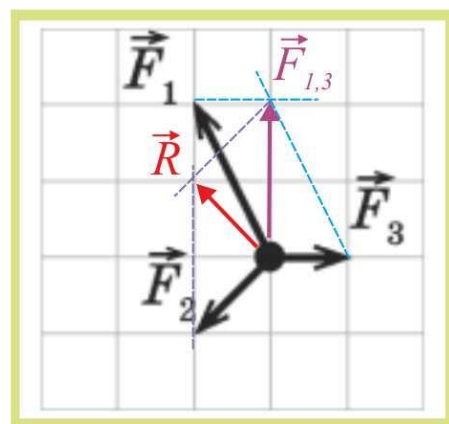
$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = m\vec{a}, \quad \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i \equiv \vec{R},$$

тело приобретёт ускорение, направление вектора которого совпадёт с направлением равнодействующей всех приложенных к телу сил.

2. Так как к телу приложена система плоских сходящихся сил, то для определения их равнодействующей можно воспользоваться правилом параллелограмма, вначале найти геометрическую сумму сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_3$ :

$$\vec{F}_{1,3} = \vec{F}_1 + \vec{F}_3,$$

а затем и равнодействующую,  $\vec{R}$  в направлении которой будет перемещаться тело.



**A2.** Чему равен угол между вектором результирующей двух одинаковых по модулю сил и осью  $OX$ , если одна из сил сонаправлена с этой осью, а вторая образует с осью  $OX$  угол  $\alpha$ ?

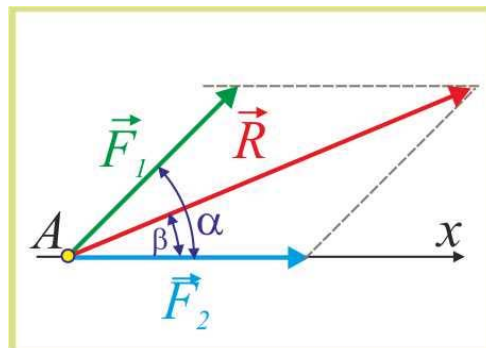
- 1)  $\alpha/2$       2)  $\alpha$       3)  $2\alpha$       4)  $\arctg(\cos\alpha)$

**Решение**

1. Равнодействующая двух сходящихся сил определяется по правилу параллелограмма. Модуль равнодействующей численно равен большей диагонали параллелограмма, построенного на векторах слагаемых сил.

2. Поскольку диагональ делит угол между векторами сил напополам, то:

$$\beta = \frac{\alpha}{2};$$



**A3.** Сила равна по модулю 10 Н и направлена под углом  $30^\circ$  к оси  $OX$  декартовой системы координат. Если ее представить в виде двух составляющих  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$ , направленных вдоль осей  $OX$  и  $OY$  соответственно, то модули сил  $\vec{F}_1$  и  $\vec{F}_2$  будут равны соответственно

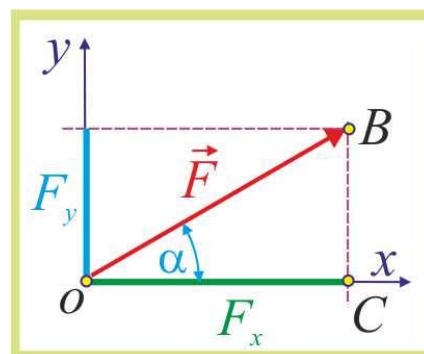
- 1) 10 Н и 10 Н  
 2) 5 Н и 5 Н  
 3) 5 Н и 8,7 Н  
 4) 8,7 Н и 5 Н

**Решение**

1.  
 2. Из прямоугольного треугольника  $OBC$ :

$$F_x \equiv F_1 = |\vec{F}| \cdot \cos \alpha \approx 10 \cdot 0,87 \approx 8,7\text{Н};$$

$$F_y \equiv F_2 = |\vec{F}| \cdot \sin \alpha \approx 10 \cdot 0,5 \approx 5\text{Н};$$



## Инерция. Первый закон Ньютона. Инерциальная система отсчёта

- A4.** Система отсчета связана с автомобилем. Ее можно считать инерциальной, если автомобиль
- 1) движется равномерно по прямолинейному участку шоссе
  - 2) разгоняется по прямолинейному участку шоссе
  - 3) движется равномерно по извилистой дороге
  - 4) вкатывается на гору с выключенными двигателями

### Решение

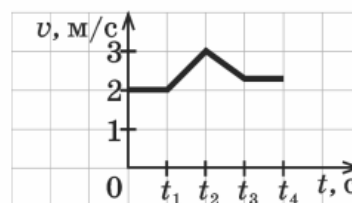
1. Инерциальной системой отсчёта называется система относительно, которой исследуемое тело либо покоится, либо движется равномерно и прямолинейно. Таким образом, равномерным является условие 1. Во всех остальных случаях автомобиль движется ускоренно и связанная с ним система отсчёта не является инерциальной.

2. Принцип движения по инерции был открыт Галилеем и оформлен Ньютоном в виде первого закона:

$$\text{Если } \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = 0, \text{ то } \left. \begin{array}{l} \vec{v} = 0; \\ \vec{v} = \text{const}; \end{array} \right\}$$

- A5.** На рисунке изображен график изменения модуля скорости прямолинейного движения вагона с течением времени в инерциальной системе отсчета. В какие промежутки времени суммарная сила, действующая на вагон со стороны других тел, не равна нулю?

- 1)  $0 - t_1; t_3 - t_4$
- 2) во все промежутки времени
- 3)  $t_1 - t_2; t_2 - t_3$
- 4) ни в один из указанных промежутков времени



### Решение

1. В соответствии с первым законом Ньютона:

$$\text{Если } \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = 0, \text{ то } \left. \begin{array}{l} \vec{v} = 0; \\ \vec{v} = \text{const}; \end{array} \right\}$$

2. Применительно к рассматриваемой задаче условие

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i \neq 0$$

выполняется при ускоренном движении вагона, в промежутках времени  $t_1 - t_2$  и  $t_2 - t_3$ , т.е. в промежутках времени, когда меряется скорость вагона.

**A6.** Лифт в течение времени  $t$  движется вверх с постоянной скоростью  $v$ . Если в неподвижном лифте груз массой  $m$  растягивал вертикальную пружину жесткостью  $k$  на длину  $x = \frac{mg}{k}$ , то в движущемся лифте он растягивает ту же пружину на длину, равную

1)  $\frac{m\left(g - \frac{v}{t}\right)}{k}$       2)  $\frac{mg}{k}$       3)  $\frac{m\left(g + \frac{v}{t}\right)}{k}$       4)  $\frac{mv}{kt}$

### Решение

1. Растяжение пружины в лифте, движущемся с постоянной скоростью будет таким же как и в неподвижном. Дополнительная сила (именуемая иногда по Даламберу) силой инерции возникает только при ускоренном движении, причём эта сила направлена всегда в сторону противоположную ускорению.

---

### Второй закон Ньютона. Масса тела. Плотность вещества

**A7.** Магнит прилип к вертикальной стенке вагона, движущегося с постоянной скоростью 50 км/ч по прямолинейному участку пути. Можно утверждать, что сумма сил, действующих на магнит,

- 1) равна нулю в системе отсчета, связанной с вагоном, и не равна нулю в системе отсчета, связанной с Землей
- 2) не равна нулю в системе отсчета, связанной с вагоном, и равна нулю в системе отсчета, связанной с Землей
- 3) не равна нулю в обеих системах отсчета
- 4) равна нулю в системах отсчета, связанных с Землей и с вагоном

### Решение

1. Систему отсчета можно считать инерциальной, если она покоится или движется равномерно и прямолинейно. Применительно к данной задаче системы отсчёта связанные как с поверхностью земли, так и с движущимся равномерно и прямолинейно вагоном будут инерциальными, поэтому сумма сил будет равна нулю при исчислении движения как относительно вагона, так и относительно земли.

---

**A8.** Спортсмен совершает прыжок в высоту. Он испытывает невесомость

- 1) только то время, когда он летит вверх до планки
- 2) только то время, когда он летит вниз после преодоления планки
- 3) только то время, когда в верхней точке его скорость равна нулю
- 4) во время всего полета

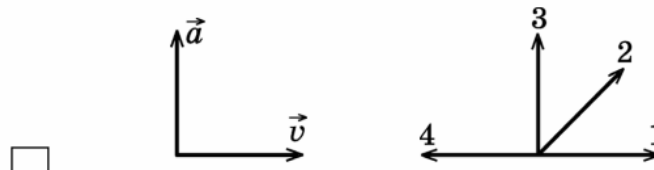


### Решение

1. Вес тела определяется мерой его воздействия на горизонтальную опору или нить подвеса. Другими словами, вес тела равен численно нормальной реакции опорной поверхности или силе упругости нити подвеса. В случае с прыгуном он испытывает состояние невесомости от момента отрыва от поверхности и до момента приземления после полёта.

**A9.** На левом рисунке представлены векторы скорости и ускорения тела. Какой из четырех векторов на правом рисунке указывает направление вектора равнодействующей всех сил, действующих на это тело?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4



### Решение

1. Согласно второму закону Ньютона в простейшем варианте:

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

с математической точки зрения представляет собой скалярное произведение скалярной величины  $m$  на векторную величину  $\vec{a}$ , вектор силы совпадает по направлению с вектором ускорения, т.е. равнодействующая приложенных сил направлена вертикально вверх.

**A10.** От однородного пластилинового куба с ребром 4 см отрезают кубик с ребром 1 см. Какую часть составляет масса малого кубика от массы исходного куба?

- 1)  $\frac{1}{64}$     2)  $\frac{1}{16}$     3)  $\frac{1}{8}$     4)  $\frac{1}{4}$

### Решение

1. Масса пластилинового кубика определяется плотностью пластилина и его объёмом:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= \rho V_1 = \rho \ell^3; \\ m_2 &= \rho \left(\frac{\ell}{4}\right)^3; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{4^3} = \frac{1}{64};$$

**B2.** На столе закреплена доска длиной  $l = 0,9$  м. На доске у ее левого торца лежит небольшой брусок. Коэффициент трения скольжения бруска о доску  $\mu = 0,5$ . Какую минимальную скорость  $v_0$  нужно сообщить бруску, чтобы он соскользнул с правого торца доски? Считать  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.

## Решение

1. Наиболее просто задача решается при использовании теоремы об изменении кинетической энергии:

$$\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = A_{1,2}; \Rightarrow \mu mg \ell = \frac{mv_0^2}{2}; \Rightarrow v_0 = \sqrt{2\mu \ell g} = \sqrt{2 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 10} = 3 \frac{\text{М}}{\text{с}}$$

**В3.** Брусок начинает двигаться по наклонной доске, нижний конец которой упирается в стол, и движется от одного до другого конца доски. Затем угол между столом и доской увеличивают и отпускают брусок из той же точки доски. Как изменятся при этом следующие величины: равнодействующая всех сил, время скольжения? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

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

### Решение

1. Движение бруска происходит вдоль оси  $x$ , проекция равнодействующей на эту ось определяется как:

$$R_x = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha = mg(\sin \alpha - \mu \cos \alpha);$$

при увеличении  $\alpha$  значение  $\sin \alpha$  будет увеличиваться, а  $\cos \alpha$  – уменьшаться, следовательно, модуль равнодействующей будет увеличиваться.

2. Кинематическое уравнение движения бруска по доске:

$$\ell = \frac{a \tau^2}{2}; \Rightarrow \tau = \sqrt{\frac{2 \ell}{a}}$$

В соответствии со вторым законом Ньютона:

$$R_x = ma_x; \Rightarrow a_x = \frac{R_x}{m},$$

т.е. при увеличении  $\alpha$  время скольжения тела по доске уменьшается.

Равнодействующая всех сил	Время скольжения
<b>1</b>	<b>2</b>

**С1.** К концам невесомой нерастяжимой нити, перекинутой через неподвижный легкий блок без трения в оси, подвешены грузы массами  $m_1 = 0,5$  кг и  $m_2 = 0,3$  кг. Чему равно ускорение, с которым движется второй груз?

1. Поскольку нить нерастяжима и невесома, то её натяжение во всех точках будет одинаковым, т.е.  $T_1 = T_2 = T$ , кроме того, грузы за одинаковое время проходят одинаковые расстояния

$$y_1 = \frac{a_1 t^2}{2} = y_2 = \frac{a_2 t^2}{2},$$

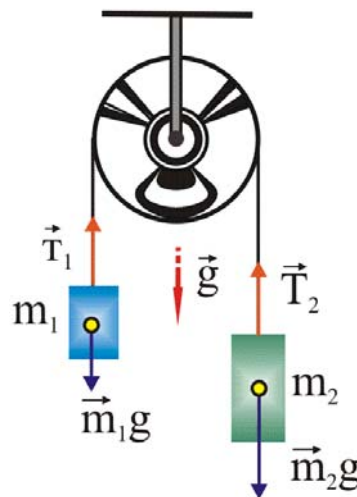
т.е. движутся с одинаковыми ускорениями  $a_1 = a_2$ .

2. Второй закон Ньютона для движущихся тел запишется следующим образом

$$\left. \begin{aligned} m_1 g - T &= m_1 a, \\ m_2 g - T &= m_2 a. \end{aligned} \right\}$$

3. Поделив уравнения системы одно на другое, получим

$$m_1 g - m_1 a = m_2 g - m_2 a, \Rightarrow a = g \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} = 10 \frac{0,5 - 0,3}{0,8} = 2,5 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$



### Третий закон Ньютона

**A11.** Яблоко массой 0,3 кг летит, оторвавшись от ветки яблони. Выберите верное утверждение о воздействии яблока и планеты Земля друг на друга.

- 1) Яблоко действует на Землю силой 3 Н, а Земля не действует на яблоко.
- 2) Земля действует на яблоко с силой 3 Н, а яблоко не действует на Землю.
- 3) Яблоко и Земля не действуют друг на друга.
- 4) Яблоко и Земля действуют друг на друга с силой 3 Н.

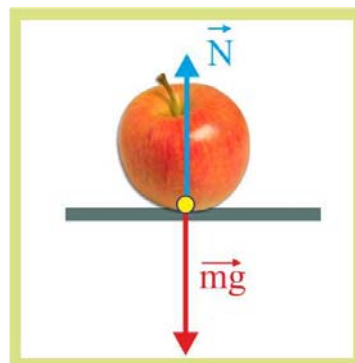
### Решение

1. **Третий закон Ньютона** (закон равенства действия и противодействия). Две материальные точки или тела действуют друг на друга с силами, равными по модулю и противоположными по направлению силами, направленными вдоль прямой соединяющей взаимодействующие точки.

2. Третий закон Ньютона имеет важное прикладное значение. В частности именно этим законом обусловлено возникновение связей при ограничении движений точки. Математическая запись третьего закона:

$$\vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{2,1} = 0.$$

При рассмотрении этого закона Ньютона, следует иметь в виду, что силы, обусловленные взаимодействием, приложены к разным телам, поэтому не представляют собой уравновешенную систему, а значит, могут приводить объекты в состояние ускоренного движения. В состоянии полёта яблоко и Земля не действуют друг на друга.



**A12.** Двое учеников стоя, на роликовых коньках, держатся за одну веревку, протянутую между ними. Когда они начинают вдвоем вытягивать веревку, первый начинает двигаться с ускорением  $a$ . С каким ускорением движется второй, если его масса в 2 раза меньше? Силой трения между роликами коньков и землей можно пренебречь.

- 1)  $2a$
- 2)  $a$
- 3)  $2a/3$
- 4)  $a/2$

**Решение**

1. В соответствии с третьим законом Ньютона

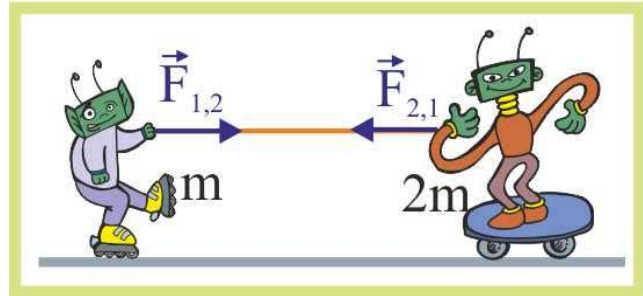
$$|\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}|;$$

2. Согласно второму закону Ньютона

$$\vec{a} = \frac{1}{m} \vec{F},$$

т.е. Ускорение прямо пропорционально действующей силе и обратно пропорционально массе тела. Второе, менее массивное тело в условиях данной задачи будет двигаться с вдвое большим ускорением:

$$|\vec{a}_2| = 2|\vec{a}_1|;$$



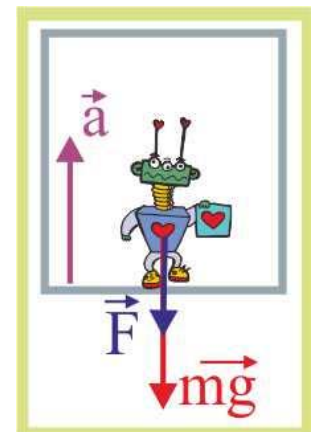
**A13.** На полу лифта, движущегося с постоянным ускорением  $\vec{a}$ , направленным вертикально вверх, лежит груз массой  $m$ . Чему равен вес этого груза?

- 1)  $mg$
- 2) 0
- 3)  $m(g + a)$
- 4)  $m(g - a)$

**Решение**

1. Ускоренное движение лифта в соответствии со вторым законом Ньютона сопровождается возникновением силы, вектор которой направлен в сторону противоположную вектору ускорения, следовательно:

$$|\vec{P}| = mg + ma = m(g + a);$$



**Закон всемирного тяготения.  
Сила тяжести. Невесомость**

- A14.** Закон всемирного тяготения  $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$  позволяет считать силу взаимодействия двух тел, если
- 1) тела являются телами Солнечной системы
  - 2) массы тел одинаковы
  - 3) известны массы тел и расстояние между их центрами тяжести
  - 4) известны массы тел и расстояние между ними, которое много больше размеров тел

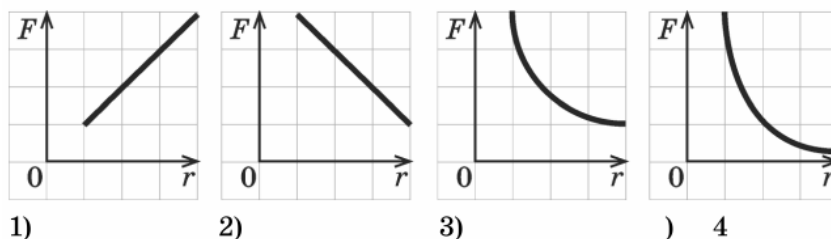
**Решение**

1. Приведенная форма закона тяготения применима в случае, когда расстояние между взаимодействующими телами во много раз больше их собственных размеров, т.е. взаимодействующие тела можно считать материальными точками, в которых сосредоточена вся масса тел.

2. В случае, когда размеры тел соизмеримы с расстоянием между ними для применения этой формулы необходимо тела разбить на множество элементарных объёмов и найти гравитационное взаимодействие каждой элементарной массы одного тела с элементарными массами другого тела, а затем результаты просуммировать:

$$\vec{F} = \sum_{k=1}^{k=N} \sum_{\chi=1}^{\chi=Z} G \frac{\Delta m_k \Delta m_{\chi}}{r_{k\chi}^3} \vec{r}_{k\chi};$$

- A15.** Какой из графиков правильно отражает зависимость модуля силы всемирного тяготения  $F$  от расстояния между телами  $r$ ?



**Решение**

1. Из закона всемирного тяготения Ньютона следует, что:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}; \Rightarrow F \sim \frac{1}{r^2},$$

т.е. сила гравитационного взаимодействия двух тел обратно пропорциональна квадрату расстояния, при  $r \rightarrow \infty$   $F \rightarrow 0$ , следовательно, правильно отображает зависимость модуля силы всемирного тяготения от расстояния между телами график 4.

**A16.** Планета имеет радиус в 2 раза меньший радиуса Земли. Известно, что ускорение свободного падения на этой планете равно  $9,8 \text{ м/с}^2$ . Чему равно отношение массы планеты к массе Земли?

- 1) 0,25
- 2) 0,5
- 3) 1
- 4) 2

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} g &= G \frac{M_3}{R^2}; \\ g &= G \frac{4M_{\text{П}}}{R^2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{M_{\text{П}}}{M_3} = \frac{1}{4} = 0,25;$$

**B4.** Автомобиль движется по выпуклому мосту, имеющему форму дуги окружности. При каком значении радиуса  $R$  этой окружности водитель испытает состояние невесомости в верхней точке моста, если доехав до этой точки он разгонит автомобиль до скорости равной по модулю  $72 \text{ км/ч}$ ? Считать  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

**Решение**

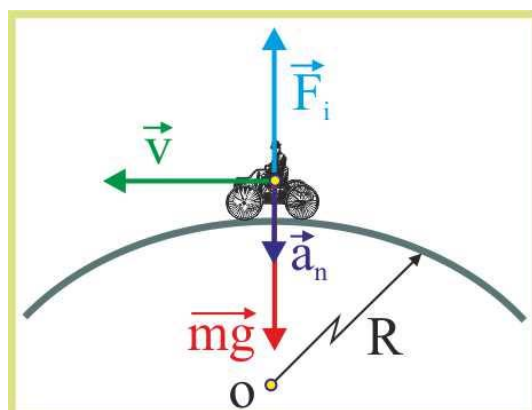
1. Движение по криволинейной поверхности моста приводит к возникновению нормального (центростремительного) ускорения  $\vec{a}_n$  и силы инерции  $\vec{F}_i$ , направленной в противоположную сторону.

2. В верхней точке моста линии действия силы инерции и нормальной реакции связи, численно равной весу тела, совпадают, поэтому:

$$N = P = mg - ma ;$$

3. Состояние невесомости описывается уравнением:

$$mg = ma_n; \quad g = \frac{v^2}{R}; \quad \Rightarrow \quad R = \frac{v^2}{g} = \frac{20^2}{10} = 40\text{м};$$



**C2.** Масса планеты составляет 0,2 от массы Земли, диаметр планеты втрое меньше, чем диаметр Земли. Чему равно отношение периодов обращения искусственных спутников планеты и Земли  $\frac{T_n}{T_3}$ , двигающихся по круговым орбитам на небольшой высоте?

**Решение**

1. Условие пребывания спутника на стационарной круговой орбите вблизи поверхности планеты:

$$\frac{mv^2}{R} = G \frac{mM}{R^2}; \quad v = \sqrt{G \frac{M}{R}};$$

2. Период обращения спутника по круговой орбите:

$$v = \omega R = \frac{2\pi}{T} R; \quad \Rightarrow \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}};$$

3. Отношение периодов:

$$\left. \begin{array}{l} T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}; \\ T_{II} = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{27 \cdot 0,2M}}; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{T_{II}}{T_3} = \sqrt{\frac{1}{5,4}} = \sqrt{0,185} = 0,43;$$

### Сила упругости. Закон Гука

**A17.** Согласно закону Гука сила натяжения пружины при растягивании прямо пропорциональна

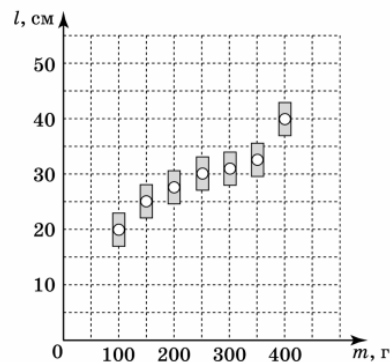
- 1) ее длине в свободном состоянии
- 2) ее длине в растянутом состоянии
- 3) разнице между длиной в растянутом и свободном состояниях
- 4) сумме длин в растянутом и свободном состояниях

### Решение

1. Уравнение закона Гука:

$$F_x = k(\ell_0 - \ell_x) = k\Delta\ell;$$

**A18.** На графике представлены результаты измерения длины вертикально висящей пружины  $l$  при различной массе  $m$  груза, подвешенного к ней. Погрешности измерения величин, отложенных по осям, отражены на графике высотой и шириной прямоугольников. С учетом погрешности измерений можно утверждать, что жесткость пружины  $k$  по данным графика приблизительно равна



- 1) 5 Н/м      2) 10 Н/м      3) 20 Н/м      4) 40 Н/м

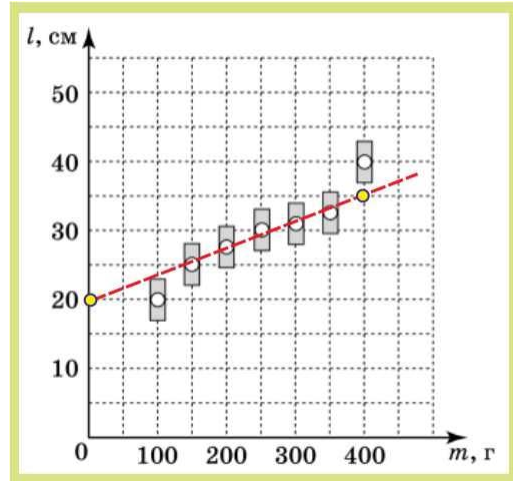
### Решение

1. Закон Гука справедлив для линейной области деформаций.

2. Из построения линейной области зависимости  $\ell = f(m)$  видно, что длина недеформированной пружины составляет  $\ell_0 = 0,2\text{м}$ .

3. Коэффициент упругости пружины для среднего значения диапазона масс груза

$$k \approx \frac{mg}{\ell - \ell_0} \approx \frac{2}{0,093} \approx 21,5 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$



**A19.** Однородную пружину длиной  $L$  и жесткостью  $k$  разрезали на 3 равные части. Чему равна жесткость каждой части пружины?

- 1)  $\frac{k}{3}$   2)  $k$   3)  $3k$   4)  $9k$

### Решение

1. Если целую пружину жесткостью  $k$  представить, как три последовательно соединённые пружины одинаковой жесткости  $k_x$ , то справедливы уравнения:

$$x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3; \quad F = k(\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3) = k \left( \frac{F}{k_x} + \frac{F}{k_x} + \frac{F}{k_x} \right);$$

$$\frac{F}{k} = \frac{3F}{k_x}; \quad \Rightarrow \quad k_x = 3k;$$

**B5.** К пружине динамометра подвешен груз массой 0,1 кг. При этом пружина удлиняется на 2,5 см. Каким будет удлинение пружины при добавлении еще трех грузов по 0,1 кг?

### Решение

1. Коэффициент упругости пружины:

$$k = \frac{m_1 g}{\Delta \ell_1} = \frac{1}{0,025} = 40 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$$

2. Удлинение пружины при подвешивании к ней груза массой  $4m_1$ :

$$\Delta \ell_x = \frac{4m_1 g}{k} = 0,1\text{м};$$

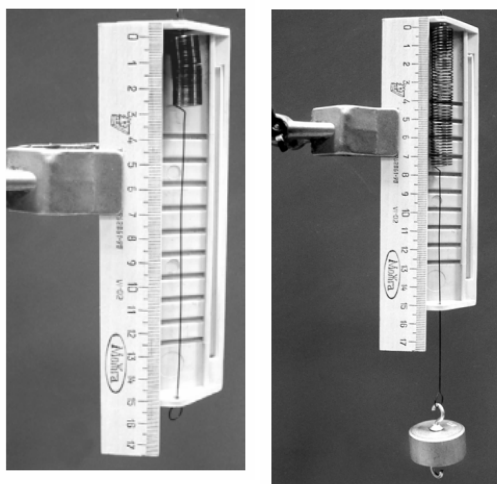


**A20.** Ученик собрал установку, представленную на рисунке справа, и подвесил к пружине груз массой 0,1 кг (рис. на следующей странице). Жесткость пружины равна

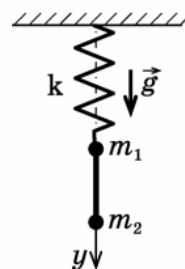
- 1) 40 Н/м
- 2) 20 Н/м
- 3)  $\approx 13$  Н/м
- 4) 0,05 Н/м

**Решение**

1. Длина недеформированной пружины:  
 $l_0 \approx 2,5\text{см} \approx 0,025\text{м};$
2. Длина пружины при подвешивания груза:  
 $l \approx 7,5\text{см} \approx 0,075\text{м};$
3. Удлинение пружины при подвешивании груза:  
 $\Delta l \approx l - l_0 = 0,05\text{м};$
4. Коэффициент жесткости пружины из закона Гука:  
 $mg = k\Delta l; \Rightarrow k = \frac{mg}{\Delta l} \approx \frac{1}{0,05} = 20 \frac{\text{Н}}{\text{м}};$



**C3.** К нижнему концу легкой пружины подвешены связанные невесомой нитью грузы: верхний массой  $m_1 = 0,5$  кг и нижний массой  $m_2 = 0,2$  кг (см. рисунок). Нить, соединяющую грузы, пережигают. С каким ускорением начнет двигаться верхний груз?



**Решение**

1. В исходном состоянии при соединённых нитью грузах система находится в равновесии, т.е. суммарная сила тяжести грузов по модулю равна силе упругости пружины:

$$F_k = (m_1 + m_2)g;$$

2. В момент пережигания нити на груз массой  $m_1$  будет действовать сила упругости и сила веса первого груза. Второй закон Ньютона в проекции на вертикальную ось для верхнего тела запишется следующим образом:

$$m_1g - F_k = m_1a;$$

при подстановке в это уравнение выражения для  $F_k$ , получим:

$$m_1g - m_1g - m_2g = m_1a; \Rightarrow -a = \frac{m_2}{m_1}g = \frac{0,2}{0,5}10 = -4 \frac{\text{м}}{\text{с}^2},$$

верхнее тело массой  $m_1$  под действием силы упругости пружины будет двигаться вверх, в сторону противоположную выбранному направлению вертикальной оси.

## Сила трения

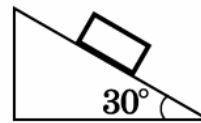
- A21.** Брусок массой  $m$  покоится на наклонной плоскости с углом наклона  $\alpha$ . Коэффициент трения бруска о поверхность  $\mu > \operatorname{tg}\alpha$ . Сила трения, действующая на брусок, равна
- 1)  $mg$       2)  $mg \sin\alpha$       3)  $\mu mg$       4)  $\mu mg \cos\alpha$

### Решение

$$F_{\text{т}} = \mu N; \quad N = mg \cos\alpha; \quad \Rightarrow \quad F_{\text{т}} = \mu mg \cos\alpha;$$

---

- A22.** Брусок массой 0,2 кг покоится на наклонной плоскости (рис.). Коэффициент трения между поверхностями бруска и плоскости равен 0,6. Сила трения равна



- 1) 0,5 Н      2) 1 Н      3) 1,7 Н      4) 2 Н

### Решение

1. Проекция силы тяжести на оси декартовой системы координат:

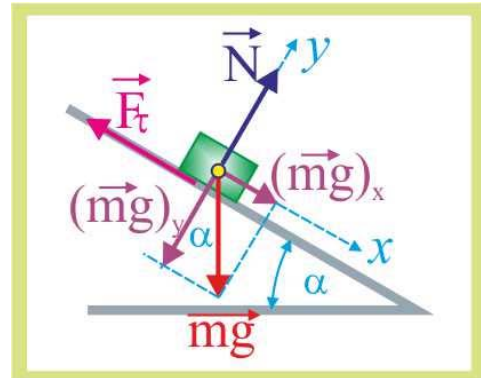
$$(mg)_x = mg \sin\alpha; \quad (mg)_y = mg \cos\alpha;$$

2. Величина силы трения  $\vec{F}_{\text{т}}$ :

$$F_{\text{т}} = \mu N; \quad N = mg \cos\alpha; \quad \Rightarrow \quad F_{\text{т}} = \mu mg \cos\alpha;$$

$$F_{\text{т}} = 0,6 \cdot 0,2 \cdot 10 \cdot 0,87 \approx 1\text{Н};$$

---



- A23.** У первой грани бруска в форме параллелепипеда площадь и коэффициент трения о стол в 2 раза больше, чем у второй грани. Согласно закону сухого трения, при переворачивании бруска с первой грани на вторую сила трения бруска о стол

- 1) не изменится  
2) уменьшится примерно в 2 раза  
3) уменьшится примерно в 4 раза  
4) увеличится примерно в 2 раза

### Решение

1. Значение силы трения не зависит от площади соприкасающихся поверхностей, и определяется коэффициентом трения скольжения и массой тела (нормальной реакцией связи), при переворачивании бруска модуль силы сухого трения уменьшится в два раза.
-

- В6.** Тело равномерно движется по горизонтальной плоскости. Сила его давления на плоскость равна 8 Н, сила трения 2 Н. Чему равен коэффициент трения скольжения?

**Решение**

$$F_{\tau} = \mu N; \Rightarrow \mu = \frac{F_{\tau}}{N} = \frac{2}{8} = 0,25;$$

- С4.** На наклонной плоскости с углом наклона  $30^{\circ}$  покоится брусок с привязанной нитью. При какой силе натяжения нити брусок сдвинется с места, если потянуть за нить вниз так, что она будет параллельна плоскости? Масса бруска 0,5 кг, коэффициент трения скольжения бруска о плоскость равен 0,7.

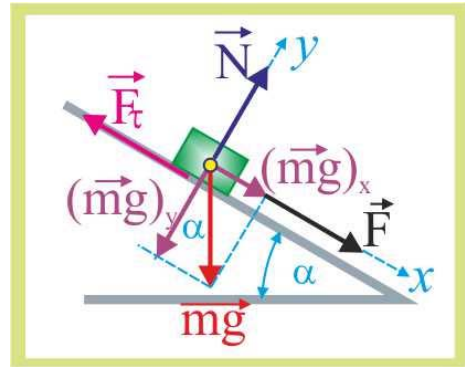
**Решение**

1. Покой бруска на наклонной плоскости обеспечивается равенством нулю геометрической суммы проекций действующих сил на направление возможного перемещения вдоль оси  $x$ .

2. Сила натяжения нити, при которой нарушится равновесие:

$$|\vec{F}| = |\vec{T}| = -\mu mg \cos \alpha + mg \sin \alpha;$$

$$|\vec{T}| = 0,7 \cdot 0,5 \cdot 10 \cdot 0,87 + 5 \cdot 0,5 \approx 0,5 \text{Н};$$



- С5.** Грузовой автомобиль с двумя ведущими осями массой  $M = 3$  т тянет за нерастяжимый трос вверх по уклону легковой автомобиль, масса которого  $m = 1$  т и у которого выключен двигатель. С каким максимальным ускорением могут двигаться автомобили, если угол наклона составляет  $\alpha = \arcsin 0,1$ , а коэффициент трения между шинами грузового автомобиля и дорогой  $\mu = 0,4$ ? Силой трения качения, действующей на легковой автомобиль, пренебречь. Массой колес пренебречь.

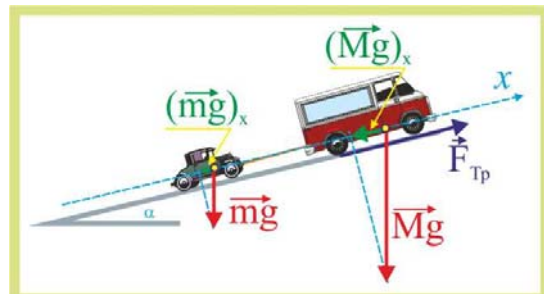
**Решение**

1. Сила трения при движении автомобиля является единственной внешней силой, обеспечивающей перемещение, второй закон Ньютона в проекции на горизонтальную ось даёт:

$$(m + M)a = \mu Mg \cos \alpha - Mg \sin \alpha - mg \sin \alpha;$$

$$\cos \alpha \approx 1; \quad \sin \alpha \approx 0,1;$$

$$a = \frac{\mu Mg \cos \alpha - g \sin \alpha (M + m)}{M + m} \approx \frac{0,4 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^3 - 4 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} \approx 2 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$



### 1.3. Импульс. Энергия. Работа. Мощность

#### Импульс тела. Закон сохранения импульса

**A1.** Движение тела массой 3 кг описывается уравнением  $x = A + Bt + Ct^2$ , где  $A = 3$  м,  $B = 4$  м/с,  $C = 2$  м/с<sup>2</sup>. Чему равна проекция импульса тела на ось  $OX$  в момент времени  $t = 3$  с?

- 1) 16 кг · м/с
- 2) 48 кг · м/с
- 3) 32 кг · м/с
- 4) 96 кг · м/с

#### Решение

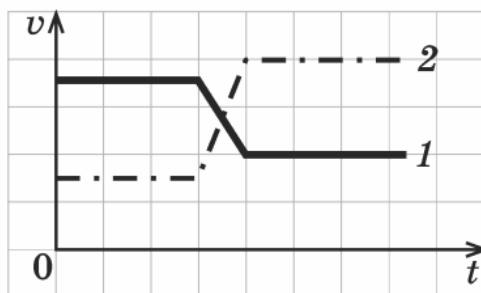
1. Проекция скорости тела в заданный момент времени:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = B + 2Ct; \quad v_x = B + 2Ct = 4 + 4 \cdot 3 = 16 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2. Проекция импульса тела на направление горизонтальной оси:

$$p_x = mv_x = 48 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$

**A2.** На рисунке изображены графики изменения скорости двух взаимодействующих тележек разной массы (одна тележка догоняет и толкает другую). Какую информацию о тележках содержат эти графики?



- 1) Тележка 1 едет сзади и имеет большую массу.
- 2) Тележка 1 едет сзади и имеет меньшую массу.
- 3) Тележка 2 едет сзади и имеет большую массу.
- 4) Тележка 2 едет впереди и имеет меньшую массу.

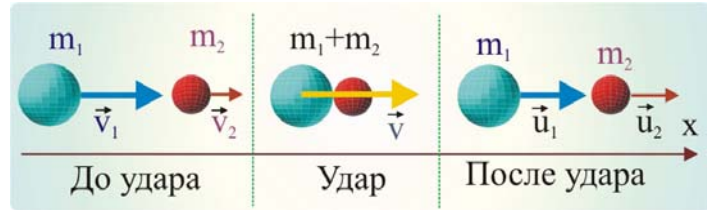
#### Решение

1. Из графиков зависимости скоростей от времени видно, что тележки взаимодействуют по упругой схеме, т. к. после удара они не движутся как одно целое, а продолжают движение с разными скоростями.

2. Твёрдые тела при столкновениях подвергаются деформациям, между сталкивающимися телами происходит обмен энергией и импульсом. Некоторая часть первоначальной энергии переходит в потенциальную энергию упругих деформаций, возбуждение колебаний и волн, а так же на совершение работы против сил внутреннего трения. Другая часть энергии расходуется на увеличение внутренней энергии тела, т.е. на увеличение температуры. При исследованиях явлений столкновения тел важное значение имеют законы сохранения импульса и механической энергии.

3. Упругий удар представляет собой столкновение тел, при котором внутренняя энергия не меняется. Центральным считается удар, когда векторы скоростей тел до столкновения направлены вдоль линии, соединяющей центры их масс.

4. Наиболее показательным примером, является центральный удар шаров, являющихся моделью заданных тележек, на которые не действуют внешние силы, в этом случае справедливы законы сохранения импульса и энергии.



Модель упругого взаимодействия

5. Поскольку после удара скорость догоняющей первой тележки массой  $m_1$  не меняет знака, то масса первой тележки больше массы второй тележки

$$m_1 > m_2;$$

**A3.** Сани массой  $m_1$  скользят по гладкому льду со скоростью  $v_1$ . На них перпендикулярно направлению движения прыгает человек массой  $m_2$  с горизонтальной скоростью  $v_2$ . Чему равен импульс саней с человеком?

- 1)  $\sqrt{m_1^2 v_1^2 + m_2^2 v_2^2}$
- 2)  $m_1 v_1 + m_2 v_2$
- 3)  $m_1^2 v_1^2 + m_2^2 v_2^2$
- 4)  $\sqrt{m_1 v_1 - m_2 v_2}$

### Решение

1. Импульсы саней и человека направлены взаимно перпендикулярно, поэтому геометрическая сумма импульсов представится так:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{p}_1 = m_1 \vec{v}_1; \\ \vec{p}_2 = m \vec{v}_2; \end{array} \right\} \Rightarrow |\vec{p}_1 + \vec{p}_2| = \sqrt{m_1^2 v_1^2 + m_2^2 v_2^2};$$

**A4.** Навстречу друг другу летят шарики из пластилина. Модули их импульсов равны соответственно  $3 \cdot 10^{-2}$  кг · м/с и  $4 \cdot 10^{-2}$  кг · м/с. Столкнувшись, шарики слипаются. Модуль импульса слипшихся шариков равен

- 1)  $10^{-2}$  кг · м/с
- 2)  $3,5 \cdot 10^{-2}$  кг · м/с
- 3)  $5 \cdot 10^{-2}$  кг · м/с
- 4)  $7 \cdot 10^{-2}$  кг · м/с

### Решение

1. Закон сохранения импульса на направление движения первого шарика:

$$|p_x| = p_2 - p_1 = 1 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м/с};$$

**B1.** Школьник массой 50 кг, стоя на очень гладком льду, бросает ядро массой 10 кг под углом  $60^\circ$  к горизонту со скоростью 10 м/с. Какую скорость приобретет школьник?

### Решение

1. Проекция импульса ядра на направление движения мальчика:

$$p_{1(x)} = -m_1 v \cos 60^\circ;$$

2. В соответствии с законом сохранения импульса:

$$m_2 v_2 = m_1 v_1 \cos 60^\circ; \Rightarrow v_2 = \frac{m_1 v_1 \cos 60^\circ}{m_2} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 0,5}{50} = 1 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

**C1.** Начальная скорость снаряда, выпущенного из пушки вертикально вверх, равна  $v_0 = 200$  м/с. В точке максимального подъема снаряд разорвался на два осколка, массы которых относятся как 1 : 4. Осколок меньшей массы полетел горизонтально со скоростью  $v_1 = 100$  м/с. На каком расстоянии от точки выстрела упадет второй осколок? Считать поверхность Земли плоской и горизонтальной. Сопротивление воздуха не учитывать.

### Решение

1. После достижения снарядом высоты  $H$  он под действием внутренних сил разрывается на два осколка, которые разлетаются в соответствии с условиями задачи горизонтально в разные стороны (в соответствии с законом сохранения импульса).

2. Скорость более тяжелого осколка будет в 4 раза меньше, чем легкого осколка:

$$m_1 v_1 = m_2 v_2; \Rightarrow v_2 = \frac{m_2}{m_1} v_1 = 25 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2. Высота подъема снаряда в высшую точку траектории определяется без учёта сил сопротивления законом сохранения энергии:

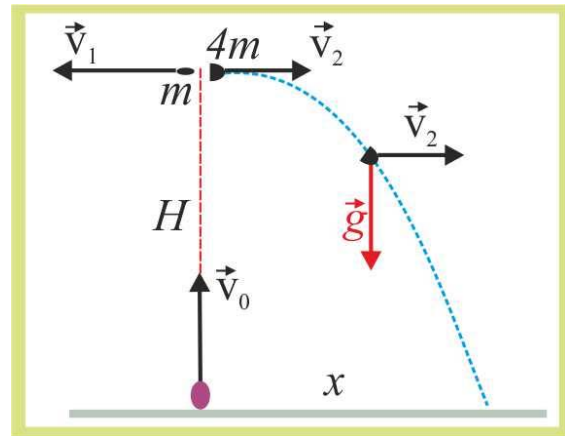
$$MgH = \frac{Mv_0^2}{2}; \Rightarrow H = \frac{v_0^2}{2g} = 2000 \text{ м};$$

3. Время падения осколков с высоты  $H$  на поверхность земли:

$$H = \frac{g\tau^2}{2}; \tau = \sqrt{\frac{2H}{g}} \approx 20 \text{ с};$$

4. После разрыва осколки будут двигаться как тела, брошенные горизонтально, с постоянной составляющей горизонтальной скорости:

$$x = v_2 \tau = 500 \text{ м};$$



## Работа силы. Мощность

### А5. Мощность (мощность силы)

- 1) в том случае больше, когда сила совершает ту же работу за меньшее время
- 2) в том случае больше, когда сила совершает ту же работу за большее время
- 3) в том случае больше, когда сила совершает меньшую работу за то же время
- 4) не существующее понятие

### Решение

1. Работа, производимая в единицу времени, называется мощностью. Математически мощность определяется в виде отношения элементарной работы к бесконечно малому промежутку времени, за который она совершается:

$$N = \frac{\delta A}{dt} = \vec{F} \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{F}\vec{v}, \quad \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \equiv \text{Вт} \right].$$

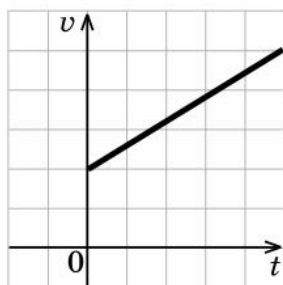
Переходя от векторов к скалярам, получим

$$N = F \cdot v \cos(\vec{F}; \vec{v}).$$

2. Из определения мощности силы и уравнений следует, что верным является утверждение 1.

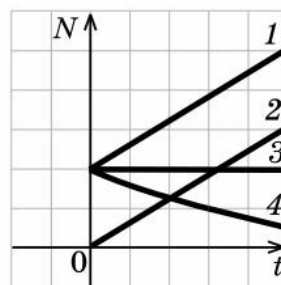
---

А6. Модуль скорости тела, движущегося под действием постоянной силы по прямой, изменяется в соответствии с графиком (рис. 1). Какой из графиков на рисунке 2 правильно отражает зависимость мощности этой силы от времени?



1) 1

2) 2



3) 3

4) 4

### Решение

1. Как следует из уравнения мощности силы:

$$N = F \cdot v \cos(\vec{F}; \vec{v}),$$

величина мощности прямо пропорциональна скорости, т.е. правильно отображает заданную зависимость скорости от времени график 1.

---

**A7.** Тело массой  $m$  скользит по горизонтальной шероховатой поверхности. Коэффициент трения между телом и поверхностью  $\mu$ . Начальная скорость движения тела равна  $v$ . Какую мощность развивала сила трения, действующая на тело в начальный момент времени?

- 1) 0            2)  $mgv$             3)  $+ \mu mgv$             4)  $- \mu mgv$

### Решение

1. Вектор силы трения всегда направлен в сторону противоположную вектору скорости, поэтому элементарная работа силы трения определяется уравнением:

$$\delta A = \vec{F}_t d\vec{r} = F_t dr \cos \alpha, \quad \alpha = 180^\circ; \quad \cos \alpha = -1;$$

2. Мощность силы трения:

$$N = -\mu mgv;$$


---

**A8.** Подъемный кран равномерно поднимает тело массой 20 кг на высоту  $h = 10$  м за время  $t = 20$  с. Чему равна мощность силы натяжения троса, к которому прицеплено тело?

### Решение

1. Скорость подъёма груза:

$$v = \frac{h}{t};$$

2. Мощность, развиваемая подъёмным краном:

$$N = mgv = \frac{mgh}{t} = \frac{20 \cdot 10 \cdot 10}{20} = 100 \text{ Вт};$$

## Простые механизмы. КПД механизма

**A9.** С помощью простого механизма

- 1) можно получить выигрыш в силе, но нельзя получить выигрыш в работе
- 2) нельзя получить выигрыш в силе, но можно получить выигрыш в работе
- 3) можно получить выигрыш и в силе, и в работе
- 4) нельзя получить выигрыша ни в силе, ни в работе

### Решение

1. Золотым правилом механики утверждается, что посредством простых механизмов (рычаг, наклонная плоскость, подвижный и неподвижный блоки и т.п.) можно получить выигрыш в силе, но проигрыш в расстоянии и наоборот. Золотое правило механики является частным случаем (простым вариантом) закона сохранения механической энергии.

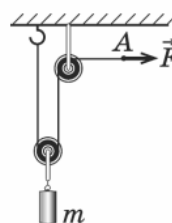
---



**A10.** С помощью системы блоков равномерно поднимают груз массой  $m = 10$  кг, прикладывая силу  $F = 55$  Н (рис.). КПД такого механизма равен

- 1) 5,5%
- 2) 45%
- 3) 55%
- 4) 91%

Ответ:



### Решение

1. Коэффициент полезного действия заданного простого механизма, состоящего из двух блоков, подвижного и неподвижного, в котором происходит выигрыш в силе и проигрыш в расстоянии:

$$\eta = \frac{mgh}{2Fh} = \frac{mg}{2F} = \frac{100}{110} \approx 0,91 (91\%);$$

**A11.** Плоскость, наклоненную к горизонту под углом  $\alpha$ , используют для равномерного втягивания груза на некоторую высоту. Силу прикладывают вдоль плоскости. Коэффициент трения груза о плоскость равен  $\mu$ . КПД такого механизма

- 1) невозможно рассчитать по этим данным
- 2)  $\mu \sin \alpha$
- 3)  $\frac{\mu}{1 + \mu \operatorname{tg} \alpha}$
- 4)  $\frac{1}{1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha}$

### Решение

1. Наклонная плоскость является простым механизмом, дающим выигрыш в силе и проигрыш в расстоянии.

2. Переместить груз вверх по наклонной плоскости из точки 1 в точку 2 можно двумя способами: поднять его вертикально вверх на высоту  $h$ , совершив при этом работу:

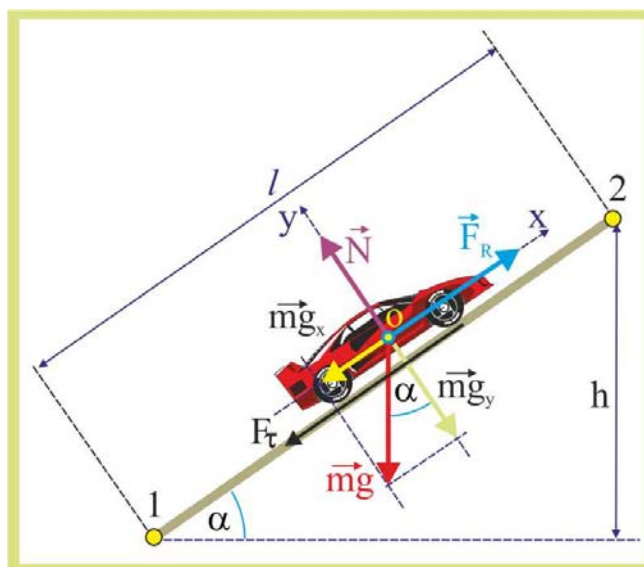
$$A_h = mgh = mg \ell \sin \alpha,$$

а можно переместить груз по наклонной плоскости, в этом случае работа будет равна

$$A_\ell = F_R \ell = (mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha) \ell;$$

3. КПД наклонной плоскости:

$$\eta = \frac{mg \ell \sin \alpha}{(mg \sin \alpha + \mu mg \cos \alpha) \ell} = \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha + \mu \cos \alpha} = \frac{1}{1 + \mu \operatorname{ctg} \alpha};$$



- B2.** С помощью неподвижного блока, закрепленного на потолке, поднимают груз массой 20 кг на высоту 1,5 м. Какую работу при этом совершают, если КПД блока равен 90%? Считать  $g = 10 \text{ м/с}^2$ . Ответ округлите до целых.

**Решение**

1. Сила, прикладываемая к канату, перекинутому через блок:

$$F = \frac{mg}{\eta} = 222 \text{ Н};$$

2. Работа силы на перемещении  $h$ :

$$A = Fh \approx 333 \text{ Дж};$$


---

**Кинетическая энергия**

- A12.** Кинетической энергией в выбранной системе отсчета обладает

- 1) тело, движущееся со скоростью, отличной от нуля
- 2) покоящееся тело, поднятое на некоторую высоту относительно поверхности Земли
- 3) упругое тело при его сжатии
- 4) упругое тело при его растяжении

**Решение**

1. Понятие и уравнение кинетической энергии следует из второго закона Ньютона:

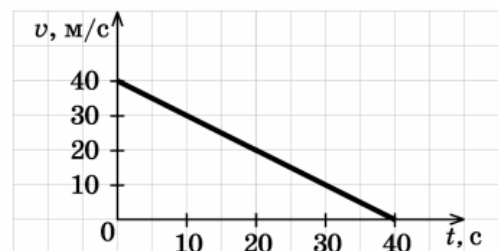
$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{или} \quad \vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad \delta A = \vec{F}d\vec{r} = ma d\vec{r} = m \cdot d\vec{v} \frac{d\vec{r}}{dt} = m\vec{v}d\vec{v}.$$

$$A_{1 \rightarrow 2} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F}d\vec{r} = \int_{v_1}^{v_2} m\vec{v}d\vec{v} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = K_2 - K_1;$$

2. Кинетическая энергия – скалярная, всегда положительная величина, численно равная половине произведения массы тела на квадрат его скорости, поэтому любой объект, обладающий массой и скоростью, имеет кинетическую энергию.
- 

- A13.** Скорость автомобиля массой 1000 кг при торможении изменяется в соответствии с графиком, представленным на рисунке. Чему равна кинетическая энергия автомобиля через 20 с после начала торможения?

- 1)  $8 \cdot 10^5 \text{ Дж}$
- 2)  $4 \cdot 10^5 \text{ Дж}$
- 3)  $2 \cdot 10^5 \text{ Дж}$
- 4)  $10^5 \text{ Дж}$



### Решение

1. По заданному графику зависимости  $v = f(t)$  определяем, что через  $\tau = 20$  с скорость тормозящего автомобиля  $v = 40$  м/с, следовательно кинетическая энергия в этот момент времени равна:

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{10^3 \cdot 40^2}{2} = 2 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,2 \text{ МДж};$$

---

**A14.** Для того чтобы увеличить кинетическую энергию тела в 9 раз, надо скорость тела увеличить в

- 1) 81 раз      2) 9 раз      3) 3 раза      4)  $\sqrt{3}$  раз

### Решение

1. Поскольку в уравнение кинетической энергии скорость входит в квадрате, то для увеличения кинетической энергии в 9 раз, скорость необходимо увеличить в три раза, т.к.  $9 = 3^2$ .

---

**A15.** Автомобиль массой  $2 \cdot 10^3$  кг движется равномерно по мосту на высоте 5 м над Землей. Скорость автомобиля равна 5 м/с. Чему равна кинетическая энергия автомобиля?

- 1)  $10^5$  Дж    2)  $10^4$  Дж    3)  $2,5 \cdot 10^4$  Дж    4)  $5 \cdot 10^3$  Дж

### Решение

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 25}{2} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Дж} = 25 \text{ кДж};$$

---

### Потенциальная энергия

**A16.** Автомобиль движется равномерно по мосту, перекинутому через реку. Механическая энергия автомобиля определяется

- 1) только его скоростью и массой  
2) только высотой моста над уровнем воды в реке  
3) только его скоростью, массой, высотой моста над уровнем воды в реке  
4) его скоростью, массой, уровнем отсчета потенциальной энергии и высотой над этим уровнем

### Решение

1. Кинетическая энергия автомобиля определяется его массой и квадратом скорости движения.

2. Потенциальная энергия (энергия состояния) возникает вследствие взаимодействия тел или частей одного и того же тела. В рассматриваемом случае потенциальная энергия определяется взаимодействием автомобиля и Земли. При рассмотрении потенциальной энергии её абсолютная величина не имеет физического смысла, потенциальная энергия исчисляется относительно нулевого уровня, выбираемого из

удобства в условиях конкретной задачи. В данном случае за нулевой уровень потенциальной энергии целесообразно принять поверхность воды в реке.

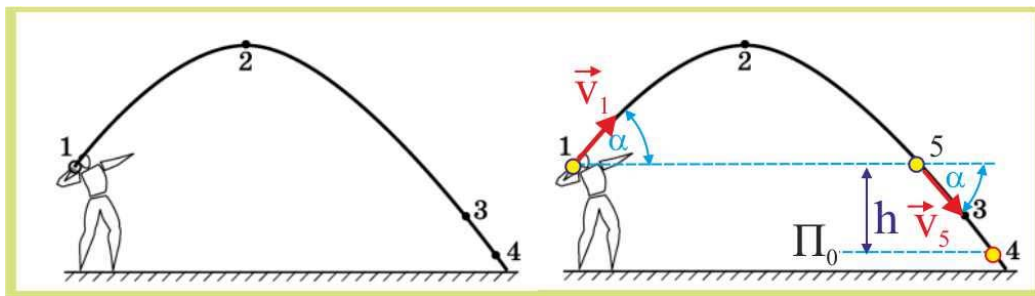
3. Механическая энергия автомобиля складывается из его кинетической и потенциальной энергии:

$$E = K + \Pi = \frac{mv^2}{2} + mgh;$$

Следовательно, верным является утверждение 4.

**A17.** На рисунке представлена траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту. В какой из четырех точек, отмеченных на траектории, кинетическая энергия тела имеет максимальное значение?

**Решение**



1. Максимальной кинетической энергией тела будет в точке 4, потому что в точке 5 кинетическая энергия будет такой же как и в начальный момент времени

$$|\vec{v}_1| = |\vec{v}_5|; \Rightarrow K_1 = K_5;$$

$$K_4 = K_5 + mgh;$$

**A18.** Как изменится потенциальная энергия упруго деформированного тела при увеличении его деформации в  $\sqrt{2}$  раза?

- 1) увеличится в 4 раза
- 2) увеличится в 2 раза
- 3) увеличится в  $\sqrt{2}$  раза
- 4) увеличится в  $\sqrt{1,41}$  раза

**Решение**

1. Потенциальная энергия упругой деформации, например, пружины:

$$\Pi_1 = \frac{k\Delta x^2}{2}; \quad \Pi_2 = \frac{k(\sqrt{2}\Delta x)^2}{2}; \quad \Rightarrow \quad \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 2;$$

**В3.** С балкона высотой  $h$  упал камень массой  $m = 0,5$  кг. Чему равен модуль изменения потенциальной энергии камня? Считать  $g = 10$  м/с<sup>2</sup>.

1. Если принять высоту балкона  $h = 4$  м, то

$$|\Delta\Pi| = mgh = 20\text{Дж};$$

## Закон сохранения механической энергии

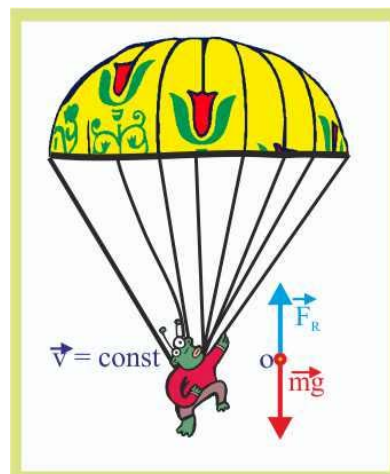
**A19.** Парашютист спускается с постоянной скоростью. Какие преобразования энергии при этом происходят?

- 1) Потенциальная энергия парашютиста преобразуется полностью в его кинетическую энергию.
- 2) Кинетическая энергия парашютиста полностью преобразуется в его потенциальную энергию.
- 3) Кинетическая энергия парашютиста полностью преобразуется во внутреннюю энергию парашютиста и воздуха.
- 4) Энергия взаимодействия парашютиста с Землей преобразуется во внутреннюю энергию взаимодействующих тел из-за сил сопротивления воздуха.

### Решение

1. Парашютиста можно рассматривать как тело падающее вертикально вниз в результате взаимодействия с Землёй с ускорением, отличным от ускорения свободного падения  $g$ .

2. Движение вниз с примерно постоянной скоростью происходит вследствие значительной силы сопротивления купола, который с позиций закона сохранения механической энергии является преобразователем кинетической и потенциальной энергии во внутреннюю энергию окружающего воздуха. Посредством купола в воздушную среду вводится энергия, обеспечивающая её дополнительное движение.



**A20.** Со дна аквариума всплывает мячик и выпрыгивает из воды. В воздухе он обладает кинетической энергией, которую приобрел за счет уменьшения

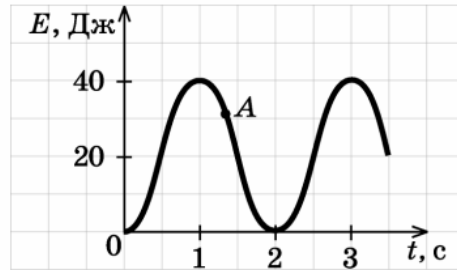
- 1) внутренней энергии воды
- 2) потенциальной энергии мяча
- 3) потенциальной энергии воды
- 4) кинетической энергии воды

### Решение

1. Механическая энергия системы "вода - мячик" без учёта сил сопротивления в соответствии с законом сохранения энергии должна сохраняться. Поскольку мячик, выпрыгивая из воды, имеет дополнительную кинетическую энергию, значит, уменьшится потенциальная энергия воды.

2. Скачок скорости на поверхности происходит из-за резкого изменения силы сопротивления движению в воде и в воздухе.

**A21.** На рисунке представлен график изменения со временем потенциальной энергии ребенка на качелях относительно нижней точки траектории. В момент, обозначенный на графике точкой А, его кинетическая энергия относительно поверхности Земли равна



- 1) 10 Дж      2) 20 Дж      3) 30 Дж      4) 25 Дж

### Решение

1. Судя по заданному графику, полная механическая энергия качающегося ребёнка равна  $E \approx 40$  Дж.

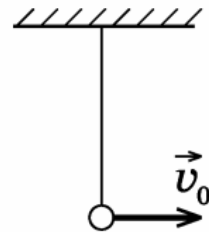
2. В заданной точке траектории кинетическая энергия составляет  $K_A \approx 30$  Дж.

3. В соответствии с законом сохранения механической энергии:

$$E = K + \Pi = \text{const}; \Rightarrow \Pi_A = E - K_A \approx 10 \text{ Дж};$$

**A22.** Шарик на длинной нити, находящемуся в положении равновесия, сообщили горизонтальную скорость  $v_0 = 2$  м/с (рис.). На какую высоту поднимется шарик?

- 1) 0,2 м  
2) 0,4 м  
3) 0,1 м  
4) 0,5 м



### Решение

$$\frac{mv_0^2}{2} = mgh; \Rightarrow h = \frac{v_0^2}{2g} = \frac{4}{20} = 0,2 \text{ м};$$

**A23.** Камень брошен вертикально вверх. В момент броска он имел кинетическую энергию 20 Дж. Какую потенциальную энергию будет иметь камень в верхней точке траектории относительно уровня, с которого он был брошен? Сопротивлением воздуха пренебречь.

- 1) 0 Дж  
2) 10 Дж  
3) 20 Дж  
4) 40 Дж

## Решение

1. В высшей точке траектории камня его скорость будет равна нулю (камень меняет направление движения), следовательно, вся кинетическая энергия камня в этой точке трансформировалась в его потенциальную энергию, т.е.

$$\Pi = K = 20 \text{ Дж};$$

**В4.** Маленький брусок скользит без трения по наклонному желобу, переходящему затем в «мертвую петлю» радиусом  $R$ , которая заканчивается горизонтальным выездом. Первый раз брусок отпускают из точки, расположенной на наклонной плоскости на высоте  $3R$  относительно нижней точки «мертвой петли», а второй раз с высоты  $4R$ ? Как при втором пуске изменятся следующие величины: максимальная высота, на которой побывает брусок после захода в мертвую петлю; сила давления на плоскость мертвой петли в точке максимального подъема?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

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

### Решение

1. Примем за нулевой уровень потенциальной энергии уровень горизонтального выезда. В точке 1 энергия бруска чисто потенциальная, причём:

$$\Pi_1 = 3mgR; \quad \Pi_2 = 4mgR;$$

2. В верхней точке петли 3 брусок будет обладать и кинетической и потенциальной энергией, причём:

$$K_1 = 3mgR - 2mgR = mgR; \quad K_2 = 2mgR;$$

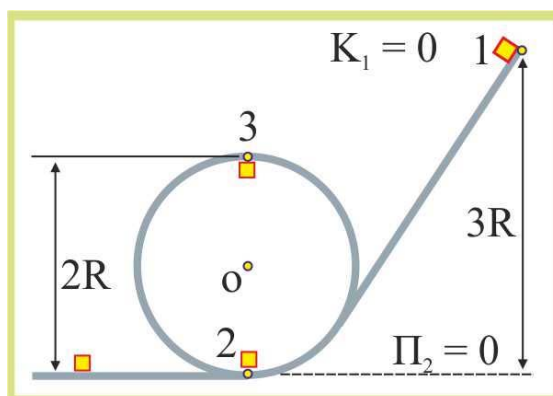
3. Квадрат скорости бруска в верхней точке петли:

$$v_1^2 = 2gR; \quad v_2^2 = 4gR;$$

4. Сила давления бруска на плоскость в верхней точке петли:

$$N = \frac{mv^2}{R} - mg; \quad \Rightarrow \quad a_n = \frac{v^2}{R} = g; \quad a_{n(1)} = 2g; \quad a_{n(2)} = 4g;$$

5. Брусок при пуске с высоты  $3R$  и  $4R$  пройдёт "мёртвую петлю", по во втором случае давление на опорную плоскость в точке 3 будет больше при высоте пуска  $4R$



Максимальная высота	Сила давления на плоскость в точке максимального подъёма
3	1

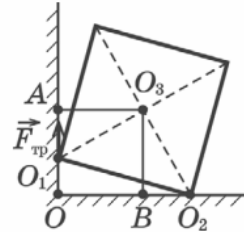
## 1.4. Статика и гидростатика

### Момент силы

**A1.** Однородный куб опирается одним ребром на пол, другим — на вертикальную стену (рис.). Плечо силы трения  $\vec{F}_{\text{тр}}$  относительно точки  $O_2$  равно

- 1)  $OO_2$
- 2)  $O_1O_2$
- 3)  $O_2O_3$
- 4) 0

Ответ:



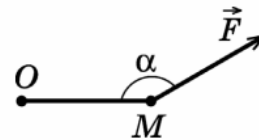
### Решение

1. Плечом силы называется кратчайшее расстояние между линией силы и осью, относительно которой определяется момент. В данном случае момент определяется относительно оси, проходящей через точку  $O_2$  перпендикулярно плоскости чертежа. Линия действия силы совпадает с направлением вертикальной стены  $OA$ , значит плечом силы является расстояние  $OO_2$

$$M_z(\vec{F}_{\text{тр}}) = -|\vec{F}_{\text{тр}}| \cdot OO_2;$$

**A2.** Момент силы  $\vec{F}$ , приложенной в точке  $M$  и лежащей в плоскости листа, относительно оси, проходящей через точку  $O$  перпендикулярно плоскости листа, равен

- 1)  $|\vec{F}| OM$
- 2)  $|\vec{F}| OM \cos \alpha$
- 3)  $|\vec{F}| OM \sin \alpha$
- 4)  $|\vec{F}| OM \operatorname{tg} \alpha$

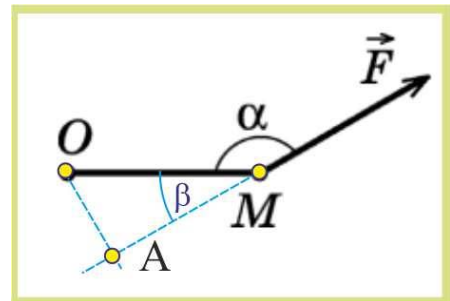


### Решение

1. Момент силы  $\vec{F}$  относительно оси, проходящей через точку  $O$  перпендикулярно плоскости чертежа равен:

$$M_z(\vec{F}) = |\vec{F}| \cdot OA;$$

$$OA = OM \cdot \sin \beta = OM \sin(180 - \alpha) = OM \sin \alpha;$$

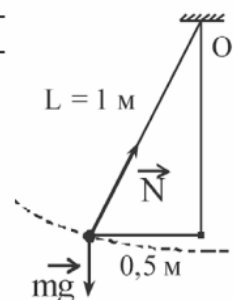




- А3.** Стальной шар массой 2 кг колеблется на нити длиной 1 м (рис.). Чему равен момент силы тяжести относительно оси, проходящей через точку  $O$  перпендикулярно плоскости чертежа, в состоянии, представленном на рисунке?

- 1) 1 Н · м
- 2) 2 Н · м
- 3) 10 Н · м
- 4) 20 Н · м

Ответ:



### Решение

$$M_z(m\vec{g}) = |mg| \cdot 0,5 = 2 \cdot 10 \cdot 0,5 = 10 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

### Условие равновесия твердого тела

4. Условия равновесия материальной точки и твердого тела в инерциальной системе отсчета требуют равенства нулю
- 1) только равнодействующей сил в первом случае и только суммы моментов сил во втором случае
  - 2) только суммы моментов сил в первом случае и только равнодействующей сил во втором случае
  - 3) только равнодействующей сил в первом случае, но равенства нулю и равнодействующей сил и суммы моментов сил во втором случае
  - 4) и равнодействующей сил, и суммы моментов сил в обоих случаях

### Решение

1. Условие равновесия материальной точки:

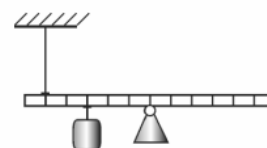
$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = 0;$$

2. Условия равновесия твёрдого тела:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i &= 0; \\ \sum_{i=1}^{i=n} M_z(\vec{F}_i) &= 0; \end{aligned} \right\}$$

- А5.** С использованием нити ученик уравнивал рычаг. Масса подвешенного к рычагу груза равна 2 кг. Если пренебречь массой рычага, то сила натяжения нити равна

- 1) 4 Н
- 2) 8 Н
- 3) 12 Н
- 4) 16 Н

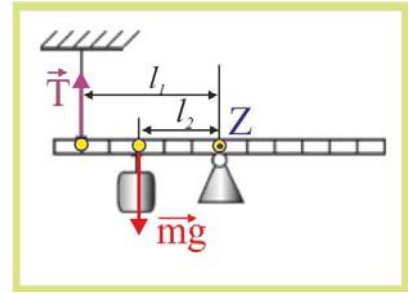


### Решение

1. Уравнение моментов сил относительно оси Z, проходящей через центр шарнира перпендикулярно плоскости чертежа:

$$mg\ell_2 - T\ell_1 = 0;$$

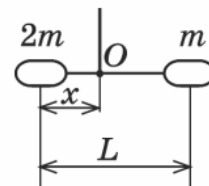
$$T = \frac{mg\ell_2}{\ell_1} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 3}{5} = 12 \text{ Н};$$



**А6.** Если закрепить два груза массами  $2m$  и  $m$  на невесомом стержне длиной  $L = 3$  м, как показано на рисунке, то, для того чтобы стержень оставался в равновесии, его следует подвесить в точке  $O$ , находящейся на расстоянии  $x$  от груза массой  $2m$ . Найдите расстояние  $x$ .

- 1) 1,2 м
- 2) 1 м
- 3) 0,75 м
- 4) 0,5 м

Ответ:



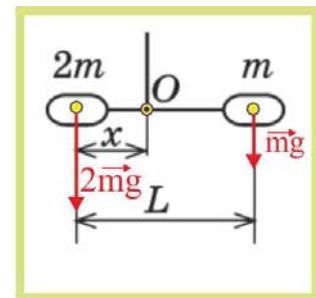
### Решение

1. Уравнение моментов сил относительно оси OZ, проходящей перпендикулярно плоскости чертежа:

$$2mgx - mg(L - x) = 0;$$

$$2mgx + mgx = mgL;$$

$$3x = L; \Rightarrow x = \frac{L}{3} = 1 \text{ м};$$



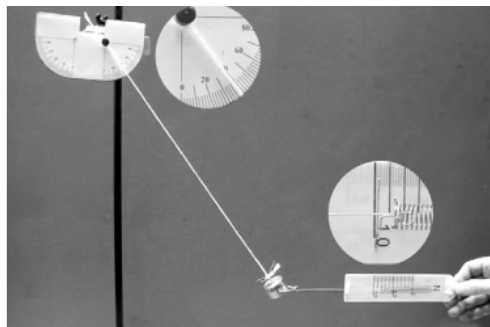
**В1.** Рычаг находится в равновесии под действием двух сил. Сила  $F_1 = 5$  Н. Чему равна сила  $F_2$ , если плечо силы  $F_1$  равно 20 см, а плечо силы  $F_2$  равно 10 см?

### Решение

$$F_1 h_1 = F_2 h_2; \Rightarrow F_2 = \frac{F_1 h_1}{h_2} = \frac{5 \cdot 20}{10} = 10 \text{ Н};$$

**А7.** Для исследования условий равновесия ученик собрал установку, представленную на рисунке. Сила натяжения нити приблизительно равна

- 1) 1 Н
- 2)  $\frac{1 \text{ Н}}{\sin 40^\circ}$
- 3)  $1 \text{ Н} \cdot \sin 40^\circ$
- 4)  $1 \text{ Н} \cdot \text{tg } 40^\circ$



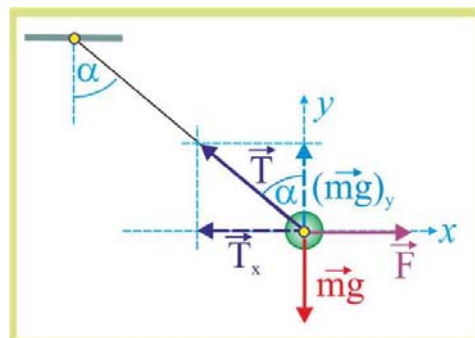
### Решение

1. Условия равновесия груза при действии на него горизонтальной силы  $F = 1 \text{ Н}$

$$\left. \begin{aligned} (mg)_y &= T \cos \alpha; \\ F &= T \sin \alpha; \end{aligned} \right\}$$

2. Из уравнения проекций сил на горизонтальную ось  $x$ :

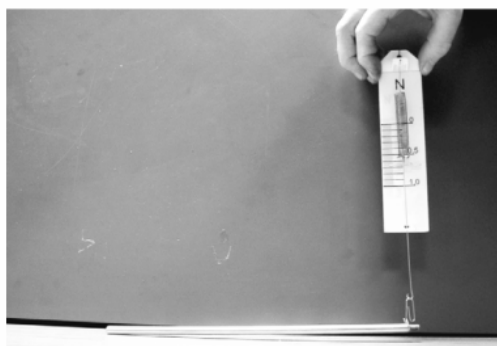
$$T = \frac{F}{\sin \alpha} = \frac{1}{\sin 40^\circ} \approx 1,56 \text{ Н};$$



**A8.** Для измерения массы однородного стержня ученик воспользовался динамометром так, как это представлено на рисунке. Масса стержня примерно равна

- 1) 25 г
- 2) 50 г
- 3) 75 г
- 4) 100 г

Ответ:

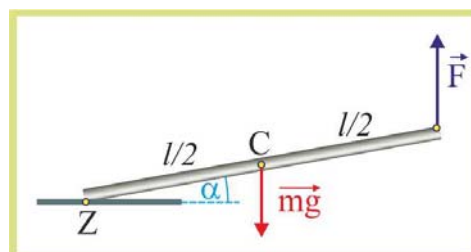


### Решение

1. Условие равновесия стержня относительно оси  $Z$ , при условии  $\sin \alpha \approx 0$ :

$$F\ell - mg \frac{\ell}{2} = 0;$$

$$m = \frac{2F}{g} = 0,1 \text{ кг};$$



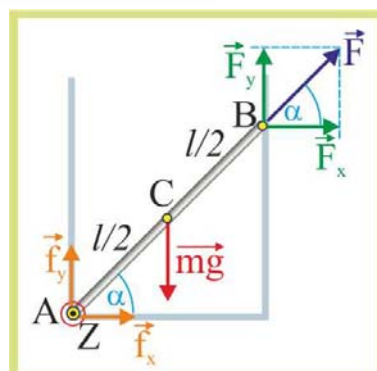
**B2.** Стержень массой 20 г упирается в дно и стенку цилиндрического стакана. С какой силой стержень давит на боковую стенку стакана, если он образует с дном угол  $\alpha = 45^\circ$ . Считать  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

### Решение

$$\sum_{i=1}^{i=n} M_Z(\vec{F}_i) = 0; \quad |\vec{F}_x| = |\vec{F}_y| = |\vec{N}|;$$

$$mg \frac{\ell}{2} \cos \alpha = N\ell \cos \alpha;$$

$$N = \frac{mg}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-2} \cdot 10}{2} = 0,1 \text{ Н};$$



## Давление. Атмосферное давление

**A9.** Давление твердого тела на поверхность — это отношение модуля

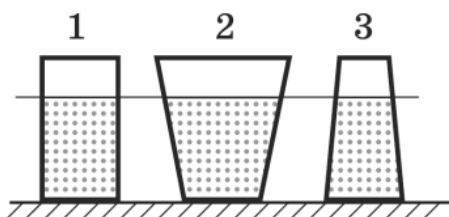
- 1) силы тяжести тела к площади соприкосновения
- 2) силы воздействия тела на поверхность к площади соприкосновения
- 3) перпендикулярной составляющей силы воздействия тела на поверхность к площади соприкосновения
- 4) касательной составляющей силы воздействия тела на поверхность к площади соприкосновения

### Решение

1. Давление определяется как отношение модуля вертикальной составляющей силы взаимодействия к площади соприкосновения.

---

**A10.** На рисунке изображены три сосуда с водой. Площади дна у сосудов равны. Сравните силы давления  $F_1$ ,  $F_2$  и  $F_3$  жидкости на дно каждого из сосудов.



- 1)  $F_1 = F_2 = F_3$
- 2)  $F_1 < F_2 < F_3$
- 3)  $F_1 = F_2 < F_3$
- 4)  $F_1 = F_2 > F_3$

### Решение

1. Одним из приложений закона Паскаля стало объяснение, так называемого, гидростатического парадокса. Три сосуда 1, 2 и 3 различной формы и объёма заполнены одинаковой жидкостью до некоторого уровня  $h$ .

2. При одинаковой плотности жидкости в сосудах её масса будет разной, причём  $m_2 > m_1 > m_3$ , естественно, если эти сосуды последовательно поставить на весы, то в каждом отдельно взятом случае показания будут различными.

3. Однако если у всех трёх сосудов площадь основания равна  $s$ , то гидростатическое давление на дно сосуда будет одинаковым, потому что в соответствии с законом Паскаля давление определяется только величиной внешних распределённых сил ( в данном случае это силы, вызванные гидростатическим давлением) и высотой столба жидкости

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_0 + \rho gh; \Rightarrow |\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = |\vec{F}_3|.$$

---

**A11.** Чему примерно равно давление, создаваемое водой на глубине 10 м?

- 1)  $10^4$  Па    2)  $2 \cdot 10^4$  Па    3)  $10^5$  Па    4)  $2 \cdot 10^5$  Па

**Решение**

$$p = \rho gh = 1 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10 = 10^5 \text{ Па};$$

**Закон Паскаля. Закон Архимеда**

**A12.** Однородное тело, полностью погруженное в жидкость, тонет, если его плотность

- 1) больше плотности жидкости  
 2) меньше плотности жидкости  
 3) равна плотности жидкости  
 4) больше или равна плотности жидкости

**Решение**

1. Как гласит легенда, Архимед, будучи в очередной раз в банях, которые в Древней Греции именовались термами, обратил внимание на то, что уровень воды в купели поднимается при опускании туда собственной ноги, и опускается, если конечность вынуть. По легенде именно это наблюдение подвигло великого грека на открытие его знаменитого закона.

2. Пусть тело в виде параллелепипеда погружено в жидкость плотностью  $\rho$  так, что его основания параллельны поверхности жидкости. На верхнее и нижнее основание будут действовать силы  $F_1$  и  $F_2$

$$F_1 = p_1 s = \rho g h_1 s,$$

$$F_2 = p_2 s = \rho g h_2 s.$$

3. Поскольку  $h_1 < h_2$ , то, очевидно, что  $F_2 > F_1$ , причём

$$F_A = F_2 - F_1 = \rho g s (h_2 - h_1).$$

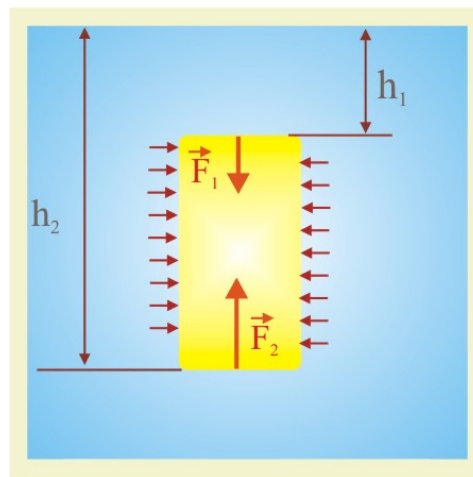
4. Разность величин  $(h_2 - h_1)$  равна высоте параллелепипеда  $h$ , которая, будучи умноженной, на площадь основания будет равна объёму тела  $V_T$ .

5. В окончательном виде сила, открытая Архимедом представится так:

$$F_A = \rho g V_T,$$

6. На тело, помещённое в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной этим телом жидкости или газа.

7. Сила Архимеда всегда присутствует совместно с силой тяжести, потому, что всё занимаемое объём обладает массой. Выталкивающая сила, равная разности архимедовой силы и силы тяжести направлена всегда вверх, и линия её действия про-



*Тело в жидкости*

ходит через центр масс жидкости (газа), вытесненной телом. Центр масс вытесненной жидкости (газа) называется центром плавучести тела. На основании уравнения силы Архимеда можно условия равновесия и устойчивости плавающих тел сформулировать следующим образом:

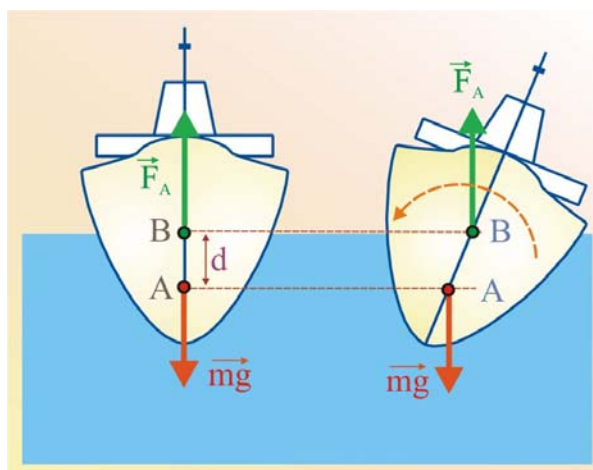
- плавающее тело будет находиться в равновесии, если его вес соответствует весу вытесненной им же жидкости, при этом центр плавучести и центр масс тела лежат на одной вертикали;
- для полностью погруженного в жидкость тела равновесие будет устойчивым, если центр масс тела будет располагаться ниже центра плавучести;
- при частичном погружении тела в жидкость равновесие будет устойчивым, если его центр масс располагается ниже метацентра. Метацентром является точка плавающего тела, в которой пересекаются линии действия выталкивающей силы в равновесном и отклонённом на малый угол состоянии.

В случае  $mg < F_A$  тело плавает на поверхности жидкости, частично погрузившись в неё, если  $mg = F_A$ , то тело полностью погружается в жидкость и находится во взвешенном состоянии. **При  $mg > F_A$  тело тонет.**

Поскольку  $mg = \rho_T V_T g$ , а  $F_A = \rho_J g V_T$ , то условие плавания тел можно выразить в виде

$$\rho_T \leq \rho_J.$$

8. Проявление силы Архимеда приобретает особое жизнеобеспечивающее значение при плавании морских транспортных средств. Судно (рис. 12.8) в упрощённом варианте находится под действием двух сил: силы тяжести и силы Архимеда. Для остойчивости судна большое значение имеет относительное расположение точек приложения этих сил. Если точка приложения силы тяжести лежит ниже точки приложения силы Архимеда, то в случае крена судна возникает восстанавливающий момент, стремящийся восстановить первоначальное положение. В противном случае, если центр масс судна располагается выше точки приложения архимедовой силы, появляющийся момент будет стремиться увеличить крен, что для судов любого класса переводит ситуацию в разряд чрезвычайных.



Остойчивость судна

9. Закон Архимеда даёт возможность измерять плотности твёрдых тел, форма которых не позволяет легко и точно определять их объёмы, чем и воспользовался в своё время сам Архимед при экспертизе царской короны. И это прославило его, он стал известен. Если вес тела произвольно причудливой формы в воздухе равен  $(mg)_{\text{воз}}$ , то при погружении его в жидкость вес станет равным  $(mg)_{\text{жид}} = (mg)_{\text{воз}} - F_A$ , т.е

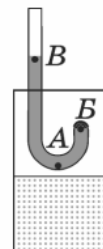
$$\rho_T = \rho_J \frac{(mg)_{\text{воз}}}{(mg)_{\text{воз}} - (mg)_{\text{ж}}}$$

10. Используя закон Архимеда можно определять плотность жидкости  $\rho_x$ , если есть возможность использовать другую жидкость с известной плотности  $\rho_0$ . Тело

взвешивается в воздухе –  $G_{\text{воз}}$  и при погружении в рабочие жидкости:  $G_0$  и  $G_x$ . В этом случае

$$\rho_x = \rho_0 \frac{G_{\text{воз}} - G_0}{G_{\text{воз}} - G_x}.$$

**A13.** На нижний конец изогнутой трубки (точка *B*) натянули резиновую мембрану, затем в трубку налили воду (рис.). Трубку начинают опускать в широкий сосуд с водой. Мембрана станет плоской, когда



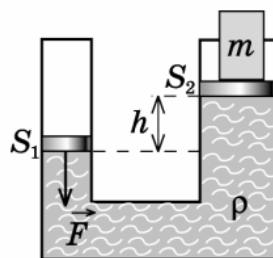
- 1) точка *A* окажется на уровне воды в сосуде
- 2) точка *B* окажется на уровне воды в сосуде
- 3) точка *B* окажется на уровне воды в сосуде
- 4) точка *A* коснется дна

### Решение

1. Как только точка *B* окажется на уровне жидкости на верхнюю поверхность перестанет действовать атмосферное давление, а поскольку в трубке налита вода, то сила Архимеда тоже станет нулевой и мембрана выпрямится.

**A14.** В сообщающиеся сосуды вставлены поршни площадью сечения  $S_1$  и  $S_2$  (рис.). На правом поршне лежит груз массой  $m$ . Разница уровней жидкости в сосудах  $h$ , плотность жидкости  $\rho$ . С какой силой  $F$  надо давить на левый поршень, чтобы система находилась в равновесии? Массой поршней и атмосферным давлением можно пренебречь.

- 1)  $\rho gh(S_2 - S_1) + mg$
- 2)  $\left(\frac{mg}{S_2} + \rho gh\right) S_1$
- 3)  $mg \frac{S_1}{S_2}$
- 4)  $\rho gh S_1$



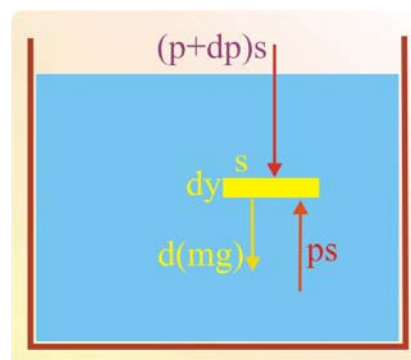
### Решение

1. Давление в жидкостях и газах в равновесном состоянии подчиняется закону Блеза Паскаля: в состоянии равновесия давление  $p$  не зависит от ориентации площадки, на которую оно действует.

2. Выделим в безграничном объеме жидкости элементарный объем толщиной  $dy$  и рассмотрим условие его равновесия. На выделенный объем жидкости действует система трёх сил

$$\{F_1 = (p + dp)s; \quad F_2 = ps; \quad d(mg)\},$$

под действием которой равновесие элементарного объема можно представить следующим уравнением:



Определение давления в безграничной жидкости



$$ps - (p + dp)s + \rho g s dy = 0,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $s dy$  – объём выделенного элемента. Преобразуем последнее уравнение

$$ps - ps + dps = -\rho g s dy,$$

или

$$\frac{dp}{dy} = -\rho g.$$

3. Уравнение определяет изменение давления с высотой, знак минус показывает, что с уменьшением высоты столба жидкости или газа гидростатическое давление уменьшается. Разделим в последнем уравнении переменные и проинтегрируем:

$$dp = -\rho g dy, \Rightarrow \int_{p_1}^{p_2} dp = -\rho g \int_{y_1}^{y_2} dy,$$

$$p_2 - p_1 = -\rho g (y_2 - y_1).$$

Если величину давления  $p_2$  принять за нулевой уровень, а почему бы и нет, то уравнение можно переписать следующим образом

$$p = p_0 + \rho g (y_2 - y_1) = p_0 + \rho g h.$$

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  $h_2$ . Предположим, что первоначально между сосудами расположена непроницаемая перегородка. В этом случае

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

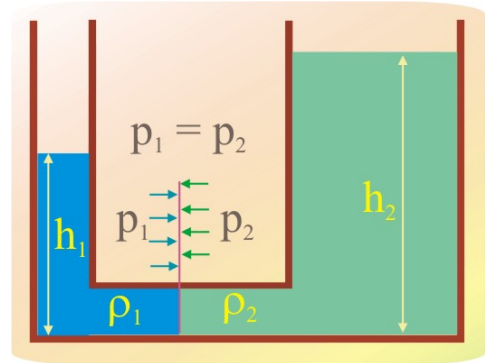
5. Поскольку разные давления действуют на одно и то же общее сечение, соединяющее сосуды, то при убирании перегородки равновесие системы нарушится, возникнут силы, которые станут перемещать жидкость плотностью  $\rho_2$  до тех пор, пока уровни в сосудах не станут одинаковыми. Закон сообщающихся сосудов имеет следующую распространённую интерпретацию

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

6. Для достижения одинакового уровня жидкости в коленах сообщающихся сосудов в условиях данной задачи необходимо компенсировать давление столба жидкости высотой  $h$  с учётом площади левого колена

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

$$\frac{F}{s_1} = \frac{mg}{s_2} + \rho g h; \Rightarrow F = \left( \frac{mg}{s_2} + \rho g h \right) s_1;$$



Сообщающиеся сосуды

**В3.** При взвешивании груза в воздухе показание динамометра равно 1 Н. При опускании груза в воду показание динамометра уменьшается до 0,6 Н. Чему равна выталкивающая сила, действующая на груз, в воде?



### Решение

1. Принимая силу Архимеда в воздухе примерно равной нулю ( $\rho_{\text{Воды}} \gg \rho_{\text{Воз}}$ ):

$$F_A \approx G_1 - G_2 = 0,4\text{Н};$$

---

**A15.** Аэростат вместимостью  $1000 \text{ м}^3$  заполнен гелием. Плотность гелия  $0,18 \text{ кг/м}^3$ , плотность воздуха  $1,29 \text{ кг/м}^3$ . На аэростат действует выталкивающая сила, равная

- 1)  $1,29 \text{ кН}$     2)  $1,8 \text{ кН}$     3)  $12,9 \text{ кН}$     4)  $180 \text{ кН}$

### Решение

1. По определению выталкивающая сила определяется как:

$$F_A = \rho_{\text{Воз}} g V = 12,9\text{кН};$$

2. Подъёмная сила воздушного шара:

$$\varphi = (\rho_{\text{Воз}} - \rho_{\text{Г}}) g V = 11,1\text{кПа};$$

---

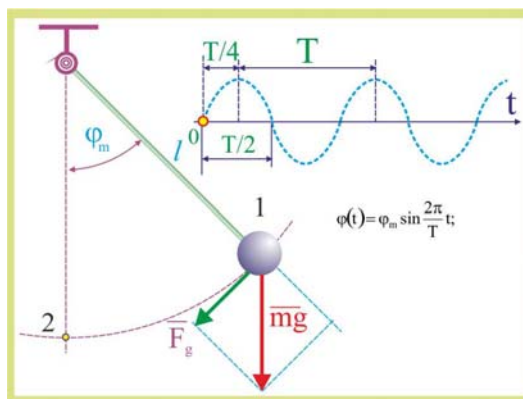
## 1.5. Колебания и волны

### Механические колебания. Амплитуда, период, частота колебаний

**A1.** За какую часть периода  $T$  шарик математического маятника проходит путь от левого крайнего положения до положения равновесия?

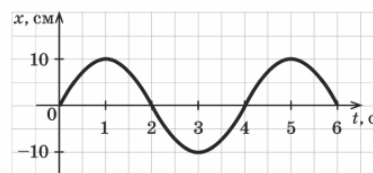
- 1)  $1T$     2)  $\frac{1}{2}T$     3)  $\frac{1}{4}T$     4)  $\frac{1}{8}T$

**Решение**

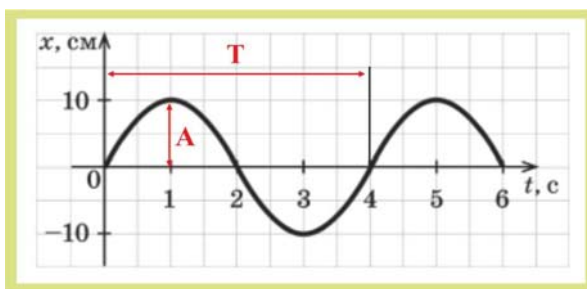


**A2.** На рисунке представлена зависимость координаты центра шара, подвешенного на пружине, от времени. Период колебаний и амплитуда равны

- 1) 4 с, 10 см  
2) 4 с, 20 см  
3) 2 с, 10 см  
4) 2 с, 20 см



**Решение**



**A3.** При гармонических колебаниях вдоль оси  $OX$  координата тела изменяется по закону  $x = 0,02\cos 20\pi t$  (м). Чему равна частота колебаний ускорения тела?

- 1)  $20\pi$  Гц      2) 20 Гц      3) 50 Гц      4) 10 Гц

**Решение**

1. Уравнение проекции ускорения как функция времени:

$$\left. \begin{array}{l} x(t) = A \cos \omega t; \\ x(t) = 0,02 \cos 20\pi t; \end{array} \right\} \Rightarrow v_x = \frac{dx}{dt} = -0,4 \sin 20\pi t; \quad a_x = \frac{dv_x}{dt} = 8 \cos 20\pi t;$$

2. Значение циклической частоты изменения проекции ускорения:

$$\omega_{a_x} = 20\pi = 62,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

**B1.** Амплитуда свободных колебаний тела равна 0,5 м. Какой путь прошло это тело за время, равное трем периодам колебаний?

**Решение**

1. В течение периода колеблющееся тело проходит путь

$$s_T = 4A = 2\text{м};$$

2. Путь за три периода:

$$s_{3T} = s_T \cdot 3 = 6\text{м};$$

### Уравнение гармонических колебаний

**A4.** В уравнении гармонических колебаний  $x = A \cos(\omega t + \varphi_0)$  величина  $\omega$  называется

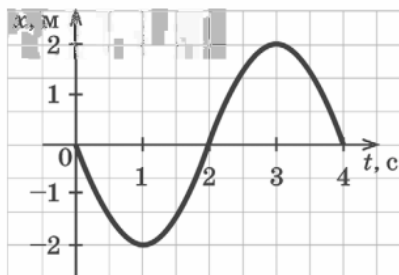
- 1) фазой  
2) частотой  
3) смещением от положения равновесия  
4) циклической частотой

**Решение**

1. Величина  $\omega$  называется циклической частотой, измеряется в рад/с и является аналогом угловой скорости при кинематическом рассмотрении движения.

**A5.** Уравнение гармонических колебаний материальной точки, график зависимости смещения от времени которой представлен на рисунке, имеет следующий вид:

- 1)  $x = -2 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right)$   
2)  $x = -2 \sin\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$   
3)  $x = 2 \sin\left(\frac{\pi t}{2} + \frac{\pi}{2}\right)$   
4)  $x = -2 \cos\left(\pi t + \frac{\pi}{2}\right)$



### Решение

1. Уравнение гармонических колебаний в общем виде:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_0\right);$$

2. Из заданного графика:

$$\varphi_0 = 0; \quad A = 2\text{см}; \quad T = 4\text{с}; \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{\pi \text{ рад}}{2 \text{ с}}; \quad \Rightarrow \quad x(t) = -2 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right);$$

---

**А6.** Зависимости некоторых величин от времени имеют следующий вид:

$$y_1 = 0,01 \sin\left(5t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$y_2 = 0,2 \sin(4t^2)$$

$$y_3 = 0,01 \sin(4\sqrt{t})$$

$$y_4 = 0,05t \sin\left(5t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Какая из этих величин описывает гармонические колебания?

1)  $y_1$

2)  $y_2$

3)  $y_3$

4)  $y_4$

### Решение

1. Уравнение гармонических колебаний в общем виде:

$$y(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t \pm \varphi_0\right);$$

1. Данному уравнению соответствует формула:

$$y_1(t) = 0,01 \sin\left(5t - \frac{\pi}{2}\right);$$

---

**А7.** Скорость тела массой  $m = 2$  кг изменяется с течением времени в соответствии с уравнением  $v_x = 0,5 \sin 5\pi t$ . Его импульс в момент времени  $0,1$  с равен

1)  $0 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$     2)  $0,5 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$     3)  $1 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$     4)  $2 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$

### Решение

1. Проекция скорости тела в заданный момент времени:

$$v_{x(\tau)} = 0,5 \sin(5\pi \cdot 0,1) = 0,5 \sin \frac{\pi}{2} = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

2. Импульс тела в заданный момент времени:

$$p_{x(\tau)} = mv_{x(\tau)} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$

---

**В2.** Изучают малые колебания груза на нити длиной  $L$  и  $2L$ , отклоняя нить на один и тот же угол от вертикали. Как при переходе к нити  $2L$  изменяются следующие величины: амплитуда колебаний груза, период колебаний?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

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

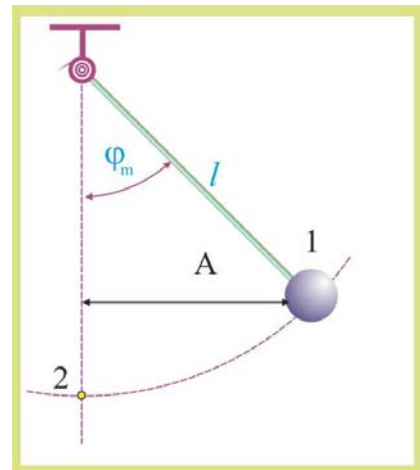
**Решение**

1. Амплитуда колебаний:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= l \sin \varphi_m; \\ A_2 &= 2l \sin \varphi_m; \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_2 > A_1;$$

2. Период колебаний:

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}; \\ T_2 &= 2\pi \sqrt{\frac{2l}{g}}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_2 > T_1;$$



Амплитуда колебаний	Период колебаний
<b>1</b>	<b>1</b>

**Свободные колебания. Превращения энергии при механических колебаниях**

**А8.** Два нитяных маятника совершают свободные колебания. За одно и то же время первый маятник совершает одно колебание, а второй — четыре. Нить первого маятника в

- 1) 16 раз длиннее
- 2) 4 раза длиннее
- 3) 2 раза длиннее
- 4) 2 раза короче

**Решение**

1. Период колебаний первого маятника в 4 раза больше периода колебаний второго маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}; \Rightarrow 4T_1 = T_2; \frac{l_1}{l_2} = 16;$$

**А9.** На Земле груз на нити совершает свободные колебания с периодом 1 с. Если на некоторой планете период колебаний этого же маятника окажется равным 0,5 с, то ускорение свободного падения на этой планете равно

- 1) 2,45 м/с<sup>2</sup>
- 2) 4,9 м/с<sup>2</sup>
- 3) 19,6 м/с<sup>2</sup>
- 4) 39,2 м/с<sup>2</sup>

### Решение

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}; \Rightarrow g = \frac{4\pi^2\ell}{T^2}; \Rightarrow \frac{g_3}{g_{\Pi}} = \frac{T_{\Pi}}{T_3}; \Rightarrow g_{\Pi} = \frac{g_3 T_3^2}{T_{\Pi}^2} \approx \frac{10 \cdot 1}{0,25} \approx 40 \frac{\text{м}}{\text{с}^2};$$

**В3.** Груз, лежащий на гладком горизонтальном столе и прикрепленный к горизонтальной пружине, совершает свободные незатухающие колебания. Пружину заменяют на пружину с меньшей жесткостью, а амплитуду колебаний оставляют неизменной. Как изменятся при этом следующие величины: период колебаний, максимальная скорость груза?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится      2) уменьшится      3) не изменится

### Решение

1. Будучи смещённой из положения статического равновесия  $O$  в положение  $B$ , масса оказывается под действием системы сил:

$$\{ m\vec{g}; \vec{N}; \vec{F}_{\text{возвр}} \equiv F_{\text{упр}} = -kx \},$$

причём сила тяжести и нормальная реакция связи, могут не учитываться при дальнейшем рассмотрении, их работа на перемещении вдоль оси  $ox$  равна нулю, т.к. обе эти силы перпендикулярны направлению перемещения,

$$\delta A = m\vec{g} \cdot d\vec{x} \cdot \cos(\vec{i}; m\vec{g}) = 0.$$

2. На направление движения будет иметь проекцию отличную, от нуля, только возвращающая сила, обусловленная, в данном случае, упругостью пружины. Уравнение второго закона Ньютона в проекции на горизонтальную ось, таким образом, запишется так

$$\sum_{i=1}^{i=n} F_{kx} = m\ddot{x}; \quad -F_B = m\ddot{x}; \quad -kx = m\ddot{x},$$

где  $k$  – коэффициент жёсткости пружины. Преобразуем последнее уравнение к виду

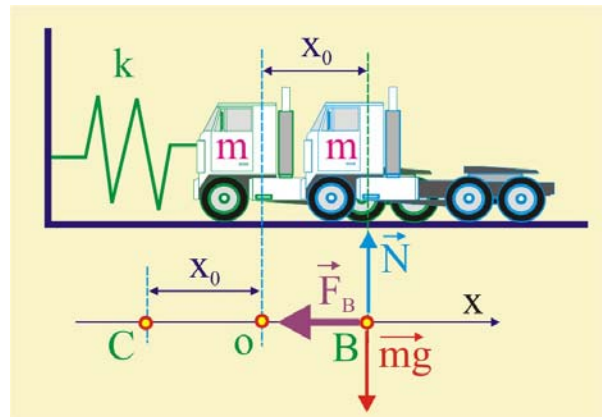
$$m\ddot{x} + kx = 0; \quad \Rightarrow \quad \ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0.$$

3. Для придания уравнению вида одного из известных типов дифференциальных уравнений, введём обозначение:

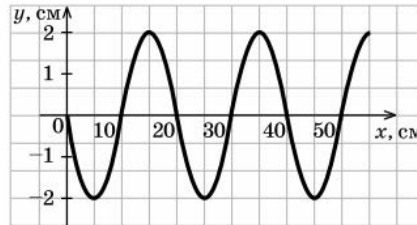
$$\frac{k}{m} = \omega^2; \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \Rightarrow \quad \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}; \quad \Rightarrow \quad T_2 > T_1;$$

4. Скорость движения груза:

$$K_{\text{max}} = \Pi_{\text{max}} = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = \frac{kx_{\text{max}}^2}{2}; \quad \Rightarrow \quad v_{\text{max}} = x_0\sqrt{k}; \quad \Rightarrow \quad v_{\text{max}(2)} < v_{\text{max}(1)};$$



- C1. Маятник с чернильницей укреплен на движущемся игрушечном автомобиле и колеблется в плоскости  $ZOY$ , перпендикулярной движению автомобиля. Длина маятника  $l = 0,1$  м. Чернильница оставила на столе след, показанный на рисунке. Чему равна скорость автомобиля?



### Решение

1. Период собственных колебаний маятника:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \approx 6,28\sqrt{\frac{0,1}{10}} \approx 0,628\text{с};$$

2. Путь, проходимый автомобилем в течение периода определяется по заданному графику движения:

$$s = 0,2\text{м};$$

3. Скорость автомобиля:

$$v \approx \frac{s}{T} \approx 0,32 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

### Вынужденные колебания. Резонанс

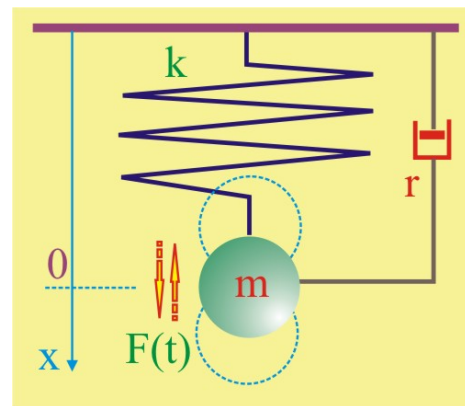
- C2. Верхний конец вертикальной пружины с грузом прикреплен к устройству с электромагнитом, которое может периодически быстро подтягивать верхний конец пружины на 1 см вверх и тут же прекращать воздействие. Оно также позволяет плавно менять период воздействия вертикальной силы к концу пружины. Опишите, что будет происходить с грузом, если включать это устройство на достаточно долгое время, всякий раз несколько увеличивая частоту воздействия силы.

### Решение

1. Рассмотрим колебательную систему в виде массы, соединённой с вертикально расположенной пружиной (рис. 3.1). Помимо силы сопротивления к массе приложена внешняя периодическая сила  $F(t)$ . Уравнение движения в этом случае запишется следующим образом

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = F(t).$$

2. Рассмотрим случай, когда внешняя возбуждающая сила изменяется по гармоническому закону с частотой  $\Omega$ , например, по закону



косинуса

$$F = F_0 \cos \Omega t .$$

Уравнение движения переписывается в виде:

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + kx = F_0 \cos \Omega t .$$

3. Введём следующие обозначения

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \beta = \frac{r}{2m}, \quad f_0 = \frac{F_0}{m},$$

что позволяет уравнение движения переписать следующим образом:

$$\ddot{x} + 2\beta\dot{x} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \Omega t .$$

4. Неоднородное дифференциальное уравнение имеет решение в виде суммы общего решения одноимённого однородного уравнения  $x_1$  и частного решения  $x_2$  неоднородного уравнения, причём

$$x_1 = e^{-\beta t} \left( C_1 e^{t\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}} + C_2 e^{-t\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}} \right),$$

$$x_2 = x_0 \cos(\Omega t - \varphi),$$

$$x = x_1 + x_2 = e^{-\beta t} \left( C_1 e^{t\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}} + C_2 e^{-t\sqrt{\beta^2 - \omega_0^2}} \right) + x_0 \cos(\Omega t - \varphi).$$

5. Первый член решения характеризует свободные затухающие колебания. Постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$ , как обычно, определяются путём подстановки начальных условий  $x(0)$  и  $\dot{x}(0)$ , имеющих место при  $t = 0$ . Второй член этого уравнения описывает стационарные вынужденные колебания, происходящие с частотой вынуждающей внешней силы  $\Omega$  с амплитудой, определяемой уравнением

$$x_0 = \frac{F_0}{\Omega \sqrt{r^2 + \left( \frac{k}{\Omega} - \Omega m \right)^2}} = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2 \beta^2}} .$$

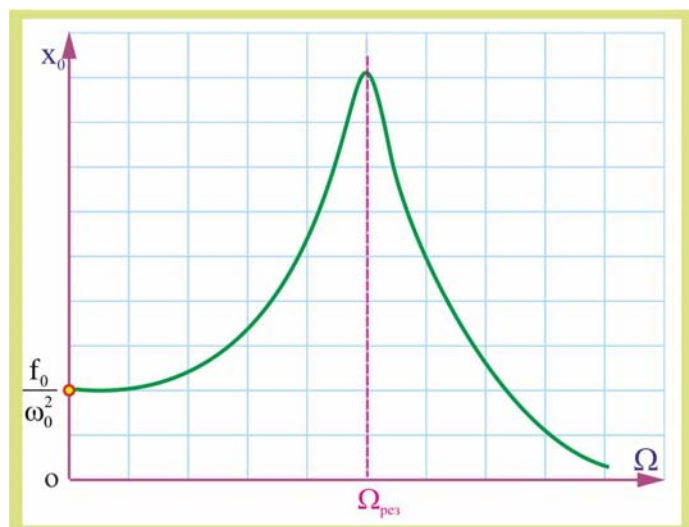
5. Сдвиг фазы колебаний относительно внешней силы равен

$$\varphi = \arctg \frac{r}{\frac{k}{\Omega} - \Omega m} = \arctg \frac{2\Omega\beta}{\omega_0^2 - \Omega^2} .$$

6. Для случая малого затухания, т.е. при  $\beta \rightarrow 0$  уравнение возможно упростить

$$x_0 = \frac{f_0}{\omega_0^2 - \Omega^2} = \frac{f_0}{1 - \left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2} ;$$

7. Очевидно, что при  $\omega_0 = \Omega$ ,  $A \rightarrow \infty$ , но это случай довольно далёк от реальности, затухание при колебаниях всегда имеет место быть. Вместе с тем уравнение позволяет установить некоторые характерные особенности поведения амплитуды вынужденных колебаний в зависимости от соотношения частот возмущающей силы и собственных колебаний.





8. Целесообразно выделить три характерных диапазона частот.

- **Область низких частот:**  $\Omega \ll \omega_0$ : в этом случае сдвиг фаз близок к нулю, а амплитуда вынужденных колебаний составит

$$x_0 \cong x_{0(\text{Стат})} = \frac{f_0}{\omega_0^2},$$

где  $x_{0(\text{Стат})}$  – статическое смещение под действием постоянной силы, равной амплитудному значению возмущающей силы, т.е.  $F = F_0$ .

- **Область высоких частот:**  $\Omega \gg \omega_0$ . Начальная фаза в этом случае  $\alpha \rightarrow -\pi$ . Колебания происходят в противофазе с вынуждающей силой. Амплитуда с ростом частоты убывает по закону

$$x_0 \cong x_{0(\text{Стат})} \cdot \left( \frac{\Omega}{\omega_0} \right)^2.$$

- **Область резонанса:**  $\Omega \cong \omega_0$ . В отсутствие сопротивления амплитуда вынужденных колебаний неограниченно возрастает. В реальных системах увеличение амплитуды будет ограничиваться диссипативными потерями.

9. Частоту вынужденных колебаний, при которой наблюдается явление резонанса, называют резонансной частотой

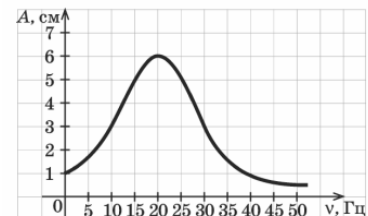
$$\Omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2};$$

при  $\beta \ll \omega_0$ ,  $\Omega_{\text{рез}} \cong \omega_0$ .

- В4.** На рисунке представлен график зависимости амплитуды  $A$  вынужденных колебаний от частоты  $\nu$  вынуждающей силы. При какой частоте происходит резонанс в колебательной системе?

**Решение**

$$\Omega_{\text{рез}} \approx 20 \text{ Гц};$$



**А10.** Свободными являются колебания

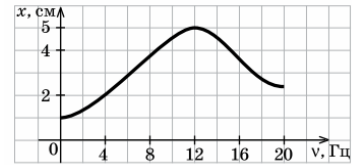
- 1) груза на нити в воздухе
- 2) маятниковых часов
- 3) периодически подталкиваемых рукой качелей
- 4) поршня в двигателе внутреннего сгорания

**Решение**

1. Свободными называются колебания, протекающие в отсутствии внешних сил, к таковым можно отнести малые гармонические колебания математического маятника (груза на нити) в воздухе (относительно малые значения сил сопротивления).

- А11.** Груз, прикрепленный к пружине жесткостью 40 Н/м, совершает вынужденные колебания. Зависимость амплитуды этих колебаний от частоты воздействия вынуждающей силы представлена на рисунке. Энергия колебаний груза при частоте 4 Гц равна

- 1)  $8 \cdot 10^{-3}$  Дж
- 2)  $1,6 \cdot 10^{-3}$  Дж
- 3)  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Дж
- 4)  $10^{-3}$  Дж

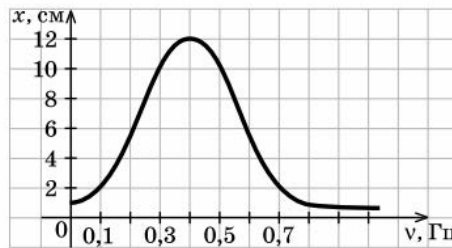


**Решение**

1. На частоте  $\nu = 4$  Гц смещение груза из положения статического равновесия равно  $\Delta x = 2 \cdot 10^{-2}$  м.
2. В соответствии с законом сохранения энергии энергия колебаний груза будет равна потенциальной энергии растянутой на  $\Delta x$  пружины

$$E = \Pi = \frac{k\Delta x^2}{2} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

**С3.** На рисунке приведен график зависимости амплитуды колебаний маятника (груза на нити) от частоты изменения внешней силы. Чему равна длина маятника?



**Решение**

1. Считая затухание малым, можно приближённо считать что:

$$\Omega_{\text{рез}} \cong \omega_0. \Rightarrow \nu_0 \approx 0,4 \text{ Гц}; \Rightarrow T = \frac{1}{\nu_0} \approx 2,5 \text{ с};$$

2. Длина математического маятника, совершающего малые колебания:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}; \Rightarrow \ell = \frac{T^2 g}{(2\pi)^2} \approx \frac{6,25 \cdot 10}{39} \approx 1,585 \text{ м};$$

**С4.** Шарик массой  $m = 0,2$  кг на нити длиной  $L = 0,9$  м раскачивают так, что каждый раз, когда шарик проходит положение равновесия, на него в течение короткого промежутка времени  $t = 0,01$  с действует сила  $F = 0,1$  Н, направленная параллельно скорости. Через сколько полных колебаний шарик на нити отклонится на угол  $60^\circ$ ?

**Решение**

1. Потенциальная энергия шарика при заданном отклонении:

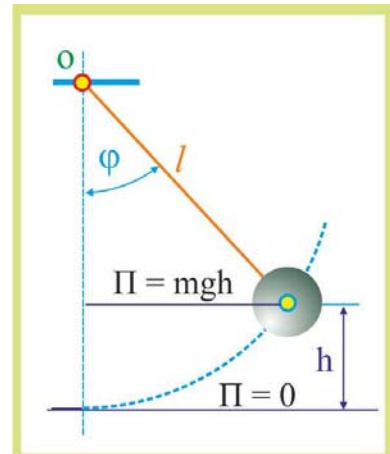
$$\Pi_\phi = mg\ell(1 - \cos\phi) = \frac{mg\ell}{2};$$

2. Скорость шарика в этот момент времени:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mg\ell}{2}; \Rightarrow v = \sqrt{g\ell} \approx 3 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

3. Импульс шарика при заданном отклонении:

$$p_1 = mv = 0,6 \text{ кг} \cdot \text{м/с};$$



4. В течении одного полного колебания шарик проходит положение равновесия дважды, импульс, сообщаемый шариком в течение периода колебаний:

$$p_2 = 2F\Delta t = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$

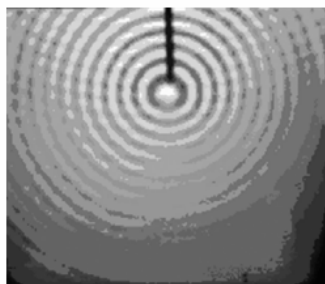
5. Количество периодов (полных колебаний) необходимых для заданного отклонения шарика:

$$N = \frac{p_1}{p_2} = 300;$$

---

### Механические волны. Длина волны. Скорость волны

**A12.** Ученик изучал волны, распространяющиеся в заполненной жидкостью ванночке при погружении в жидкость вертикального стержня с различной частотой. Волны, доходя до края ванночки, практически затухали. Меняя частоту опускания стержня в воду  $v$ , ученик фотографировал картину распространения волн сверху (см. рисунок) и, анализируя фотографии, измерял длину волны  $\lambda$ , распространяющейся по поверхности воды.



В результате он получил экспериментальную зависимость длины волны от частоты колебаний стержня, которая удовлетворительно описывалась функцией  $\lambda(v) = \frac{C}{v^2}$ .

Исходя из полученной зависимости, можно утверждать, что при увеличении  $\lambda$  в 4 раза скорость распространения волны  $v$  в ванночке

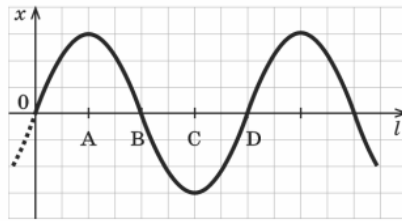
- 1) не изменится
- 2) возрастет в 4 раза
- 3) уменьшится в 4 раза
- 4) возрастет в 2 раза

#### Решение

1. Возрастет в два раза.

---

**A13.** На рисунке изображен шнур, по которому распространяется волна, в некоторый момент времени. Расстояние между какими точками равно половине длины волны?



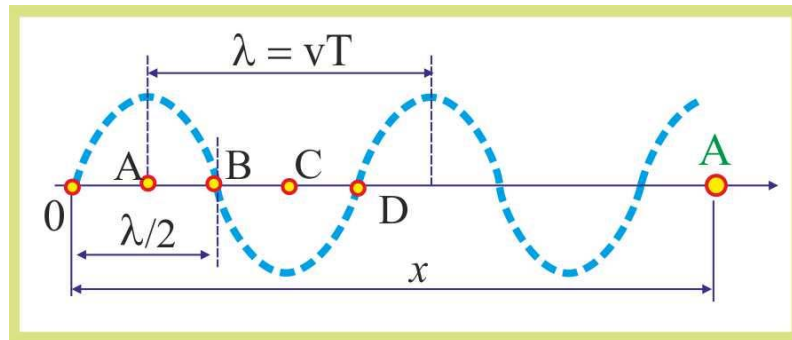
1)  $OB$

2)  $AB$

3)  $OD$

4)  $AD$

**Решение**



**A14.** Волны от камня, упавшего в воду на расстоянии  $s$  м от берега, дошли до берега за  $t$  с. Чему равно расстояние между гребнями волн, если волны бьются о берег с частотой  $n$  ударов в секунду?

1)  $stn$

2)  $\frac{st}{n}$

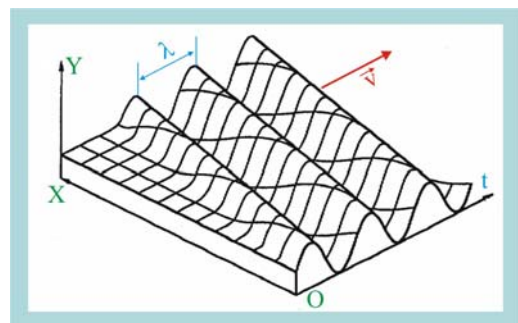
3)  $\frac{s}{tn}$

4)  $\frac{sn}{t}$

**Решение**

$$\lambda = vT = v \left( \frac{2\pi}{\omega} \right) = \frac{v}{n}, \Rightarrow v = n\lambda;$$

$$v = \frac{s}{t}; \quad \frac{s}{t} = n\lambda; \Rightarrow \lambda = \frac{s}{tn};$$



**B5.** Волна частотой 4 Гц распространяется по шнуру со скоростью 8 м/с. Определите длину волны.

**Решение**

$$v = v\lambda; \Rightarrow \lambda = \frac{v}{\nu} = 2\text{м};$$

## Звук

**A15.** Какие изменения отмечает человек в звуке при увеличении частоты колебаний в звуковой волне?

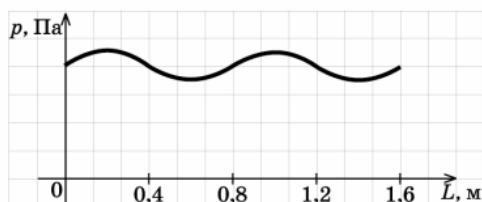
- 1) повышение высоты тона
- 2) понижение высоты тона
- 3) увеличение громкости
- 4) уменьшение громкости

### Решение

1. Больше частоте колебаний соответствует более высокий тон, являющийся субъективной характеристикой звуковых волн.

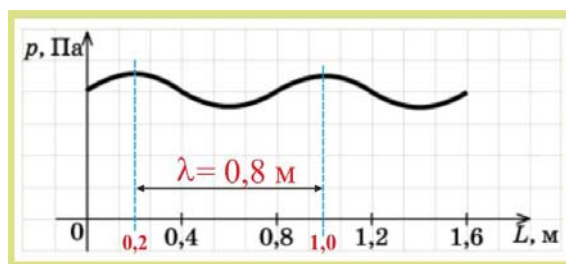
---

**A16.** На рисунке показан график зависимости давления воздуха в некоторый момент времени от расстояния до источника звука при распространении звуковой волны. Из этого графика следует, что длина звуковой волны равна



- 1) 0,2 м
- 2) 0,4 м
- 3) 0,8 м
- 4) 1,6 м

### Решение



**A17.** Ультразвуковой эхолот улавливает отраженный от дна моря сигнал через время  $t$  после его испускания. Если скорость ультразвука в воде равна  $v$ , то глубина моря равна

- 1)  $vt$
- 2)  $2vt$
- 3)  $\frac{vt}{2}$
- 4)  $0$

### Решение

1. Расстояние от судна до дна ультразвуковая волна проходит дважды, поэтому:

$$h = \frac{vt}{2};$$

---

**A18.** Расстояния от двух когерентных источников волн до точки  $M$  равны  $a$  и  $b$ . Разность фаз колебаний источников равна нулю, длина волны равна  $\lambda$ . Если излучает только один источник волн, то амплитуда колебаний частиц среды в точке  $A$  равна  $A_1$ , если только второй, то —  $A_2$ . Если разность хода волн  $a - b = \frac{3\lambda}{2}$ , то в точке амплитуда суммарного колебания частиц среды

- 1) равна нулю
- 2) равна  $|A_1 - A_2|$
- 3) равна  $|A_1 + A_2|$
- 4) меняется со временем периодически

**Решение**

1. Условие интерференционного минимума при сложении двух когерентных волн:

$$\Delta = a - b = (2m - 1)\frac{\lambda}{2}; \quad m = 2; \quad \Delta = \frac{3\lambda}{2}; \quad \Rightarrow \quad A_{\Sigma} = |A_1 - A_2|;$$


---

**B6.** Узкий пучок ультразвуковой волны падает на поверхность воды перпендикулярно ее поверхности. Скорость ультразвука в воде больше чем в воздухе. Как изменятся в воде длина волны и период колебаний давления в точке прохождения волны в среде?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения.

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

**Решение**

1. Длина волны:

$$\lambda_{\text{Воз}} = \frac{c_{\text{Воз}}}{\nu} \approx \frac{340}{\nu}; \quad \lambda_{\text{Воды}} = \frac{c_{\text{Воды}}}{\nu} \approx \frac{1500}{\nu}; \quad \Rightarrow \quad \lambda_{\text{Воды}} > \lambda_{\text{Воз}}; \quad \frac{\lambda_{\text{Воды}}}{\lambda_{\text{Воз}}} \approx 4,4;$$

2. Период колебаний звукового давления, величина обратная частоте, а частота определяется только источником колебаний и не зависит от свойств среды, в частности от акустического сопротивления  $\rho c$ .

Длина волны	Период колебаний давления
<b>1</b>	<b>3</b>

---

## 2. Молекулярная физика. Термодинамика

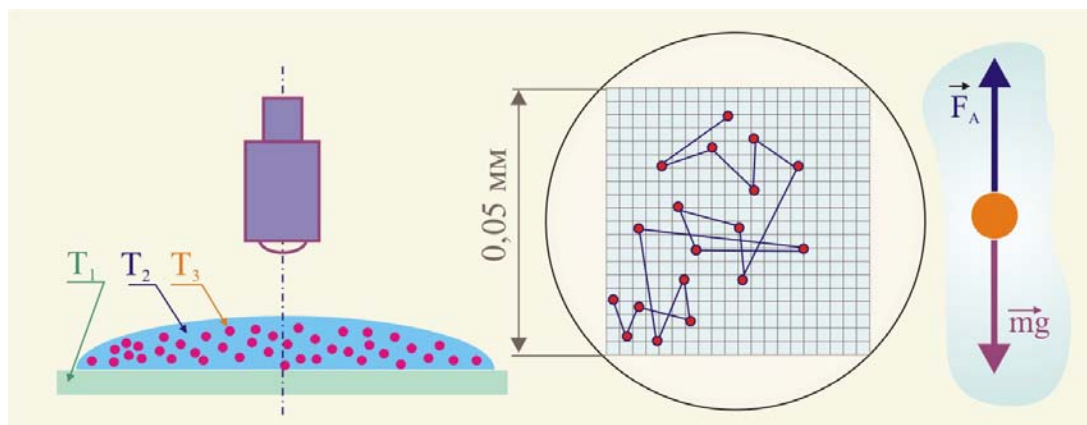
### 2.1. Молекулярное строение вещества

#### Дискретное строение вещества

- A1.** Ботаник Броун, наблюдая в микроскоп за спорами растений в воде, обнаружил, что они постоянно беспорядочно движутся. Это явление можно объяснить
- 1) тем, что споры — часть живых организмов
  - 2) вибрацией стола
  - 3) ударами молекул воды
  - 4) хаотическим изменением вязкости жидкости

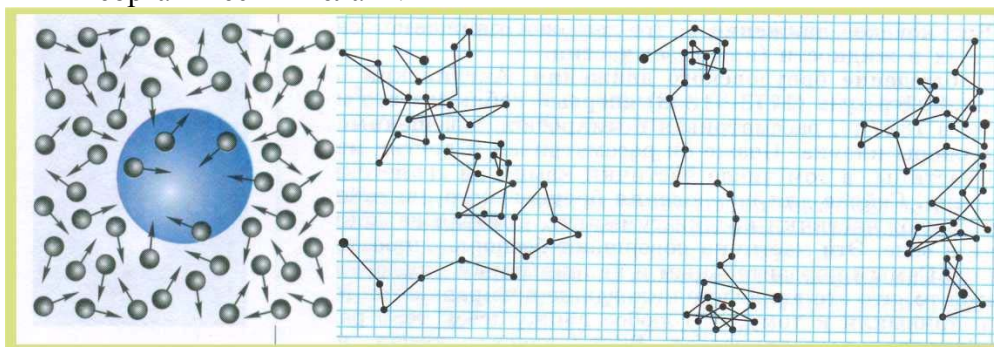
#### Решение

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.



2. 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. 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 содрагали 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. 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».



3. 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. 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. 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.

4. 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.

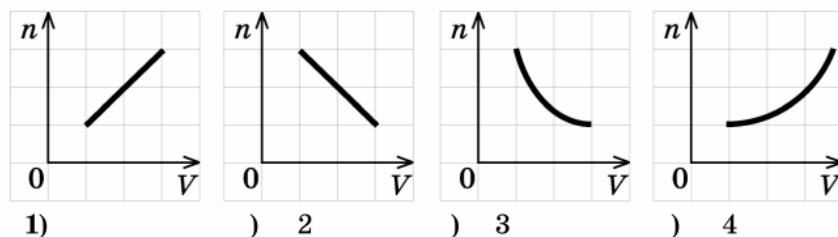
5. Ботанику, можно сказать, повезло. Броун совершенно случайно в качестве объектов исследования выбрал частицы, на которые в воде действовали две силы: сила тяжести и сила Архимеда, причём модули этих сил были практически одинаковы. Частицы находились в воде в состоянии безразличного равновесия. Физики 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

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

**A2.** Газ сжимают в сосуде с подвижным поршнем. Какой из графиков правильно отражает зависимость концентрации молекул (числа молекул в единице объема) газа от объема?



**Решение**

1. Концентрация молекул численно равна числу молекул, содержащихся в единице объема:

$$n = \frac{N}{V}; \quad N = \text{const}; \quad \Rightarrow \quad n \sim \frac{1}{V}; \quad \Rightarrow \quad \text{график 3.}$$

**A3.** В горизонтальном цилиндре имеется перегородка площадью  $S$ , по одну сторону которой давление газа равно  $p_1$ , по другую  $p_2$ . Суммарная сила, действующая на перегородку со стороны газов, равна по модулю

- 1)  $(p_1 + p_2)S$
- 2)  $|p_1 - p_2|S$
- 3)  $\frac{(p_1 + p_2)}{S}$
- 4)  $\frac{|p_1 - p_2|}{S}$

**Решение**

1. Давлением называется отношение модуля силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности:

$$p = \frac{|\vec{F}_\perp|}{S}; \quad \Rightarrow \quad |\vec{F}_\perp| = ps; \quad \Rightarrow \quad |\vec{F}_x| = |p_1 - p_2|s;$$

**B1.** При нагревании спирта его объем увеличивается. Как изменятся в ходе процесса следующие величины: масса молекул, расстояние между молекулами?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

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

### Решение

1. При нагревании увеличивается объём, занимаемый веществом, т.е. уменьшается концентрация молекул, в единице объёма содержится меньшее количество молекул, следовательно, расстояние между их центрами увеличивается.

2. При нагревании спирта  $C_2H_5OH$  структура молекул не изменяется, значит масса их остаётся постоянной.

Среднее расстояние между молекулами	Масса молекул
<b>1</b>	<b>3</b>

**А4.** Укажите пару веществ, скорость диффузии которых наибольшая при прочих равных условиях:

- 1) раствор медного купороса и вода
- 2) пары эфира и воздух
- 3) свинцовая и медная пластины
- 4) вода и спирт

### Решение

1. Рассмотрим концентрацию молекул  $n$ , как функцию некой 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

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

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

$$[D] = \frac{\Phi}{\frac{\partial n}{\partial z} s} = \frac{c^{-1} \cdot m \cdot m^3}{m^2} = \frac{m^2}{c}.$$

2. Знак минус в уравнении 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

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

т.к. плотность газа  $\rho = mn$ . Уравнение выражает собой первый закон Фика, который предполагает определение коэффициента диффузии  $D$  для каждого вещества экспериментальным путём. Коэффициент диффузии газов больше, чем жидкостей и ещё больше, чем у веществ в твёрдом состоянии, следовательно скорость диффузии будет наибольшей для эфира и воздуха.

**А5.** На рисунке приведена ячейка таблицы Д.И. Менделеева. Согласно информации из этой таблицы, масса молекулы кислорода равна

- 1)  $\approx 8$  г
- 2)  $\approx 16$  г
- 3)  $\approx 0,032$  кг
- 4)  $\approx 5,3 \cdot 10^{-26}$  кг

<div style="display: inline-block; border: 1px solid black; padding: 2px;"> <span style="font-size: 2em; font-weight: bold;">O</span><sup>8</sup>  <span style="font-size: 0.8em;">15,994</span> </div>
---

**Решение**

1. Молекула кислорода состоит из двух атомов:

$$\mu(\text{O}_2) \approx 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}; \quad \mu = m_0 N_A; \quad \Rightarrow \quad m_0 = \frac{\mu}{N_A} \approx \frac{32 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} \approx 5,33 \cdot 10^{-26} \text{ кг};$$

**А6.** В таблице представлены результаты измерения диаметра  $D$  пятна, наблюдаемого через промежуток времени  $t$  на мокрой пористой бумаге, лежащей на дне горизонтального плоского сосуда покрытого крышкой, после того как на мокрую бумагу капнули каплю концентрированного раствора марганцовки.

$t$ , ч	0	1	2	4
$D$ , мм	6	10	11,5	13,5

Какое явление стало причиной роста размеров пятна с течением времени?

- 1) растворение
- 2) диффузия
- 3) распад красителя
- 4) броуновское движение

**Решение**

1. В данном опыте наблюдается диффузия жидкости в пористом твёрдом теле. Согласно второму закону Фика:

$$D_{\text{Пятна}} \sim \frac{\partial n}{\partial t} = D \frac{\partial^2 n}{\partial t^2};$$

**А7.** Броуновским движением является

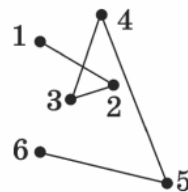
- 1) беспорядочное движение мелких пылинок в воздухе
- 2) беспорядочное движение мошек, роящихся вечером под фонарем
- 3) проникновение питательных веществ из почвы в корни растений
- 4) растворение твердых веществ в жидкостях

**Решение**

1. Броуновским движением называется беспорядочное движение микроскопических видимых, взвешенных в жидкости или газе частиц твердого вещества, вызываемое тепловым движением частиц жидкости или газа. Броуновское движение никогда не прекращается. Броуновское движение связано с тепловым движением, но не следует смешивать эти понятия. Броуновское движение является следствием и сви-

детельством существования теплового движения. Пылинки в воздухе попадают под это определение.

**A8.** На рисунке показаны положения броуновской частицы в жидкости с интервалом 30 с, которые наблюдались под микроскопом. Изменение направления перемещения частицы в точке 2 произошло вследствие изменения



- 1) направления конвективных потоков жидкости
- 2) сил поверхностного натяжения
- 3) вязкости жидкости
- 4) равнодействующей сил действия молекул жидкости на частицу

### Решение

1. В соответствии со вторым законом Ньютона:

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

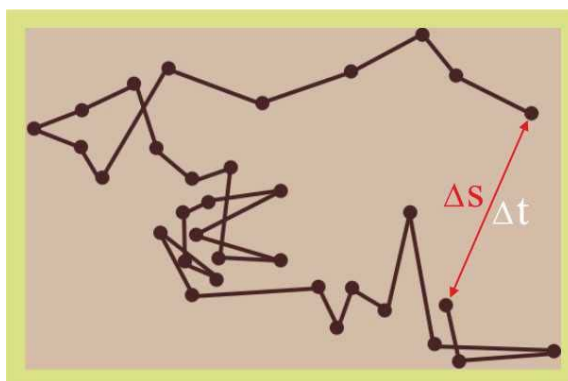
направление равнодействующей определяет направление изменения импульса (4).

**A9.** Броуновская частица переместилась за промежуток времени  $\Delta t$  на расстояние  $\Delta s$ . В этот промежуток времени она

- 1) двигалась прямолинейно с постоянной скоростью  $\frac{\Delta s}{\Delta t}$
- 2) двигалась прямолинейно с постоянным ускорением  $\frac{2\Delta s}{\Delta t^2}$
- 3) гармонически колебалась с амплитудой  $\Delta s$  и периодом  $\Delta t$
- 4) двигалась так, что закономерностей в форме ее траектории обнаружить не удалось

### Решение

1. Частота столкновений молекул  $\nu = \langle v \rangle / \lambda \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ , т.е. измерить сколько изменений направления за время  $\Delta t$  измерить невозможно, что говорит о непредсказуемости траектории.



## Взаимодействие частиц вещества

**A10.** В колбе с кислородом при нормальных условиях среднее расстояние между молекулами примерно

- 1) равно диаметру молекулы кислорода
- 2) в 10 раз больше диаметра молекул кислорода
- 3) в 100 раз больше диаметра молекул кислорода
- 4) в 1000 раз больше диаметра молекул кислорода

### Решение

1. Один моль любого вещества, включая и кислород, при нормальных условиях занимает объём  $V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , и состоит из  $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ , поэтому объём сопоставимый с одной молекулой (принимая этот объём за мироздание кубик):

$$V_1 = \frac{V_0}{N_A} \approx \frac{22,4 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{23}} \approx 3,8 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3;$$

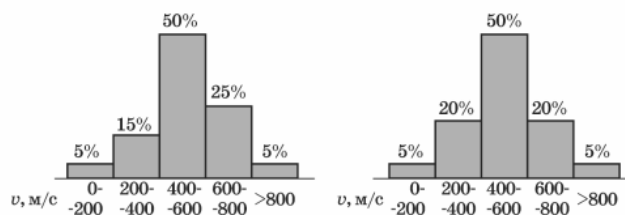
2. Ребро элементарного кубика:

$$l_1 = \sqrt[3]{V_1} \approx 3,4 \cdot 10^{-9};$$

3. Принимая диаметр молекулы  $d_1 \approx 10^{-10}$  м, имеем:

$$\xi = \frac{l_1}{d_1} \approx 10;$$

**A11.** В опытах по измерению скоростей молекул газа получены следующие диаграммы распределения молекул по скоростям. Как соотносятся средние скорости молекул в 1-м и 2-м опытах?



- 1)  $v_1 = v_2$
- 2)  $v_1 > v_2$
- 3)  $v_1 < v_2$
- 4) невозможно оценить по приведенным данным

### Решение

1. Гистограммы отличаются тем, что в интервалах средних скоростей  $\langle v \rangle = 600 - 800$  м/с в первом случае молекул на 5% больше, т.е. максимум в первом случае будет располагаться правее по оси скоростей, следовательно для средних скоростей:

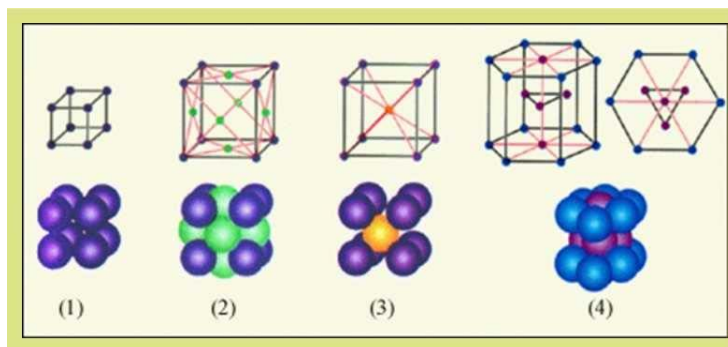
$$v_1 > v_2;$$

$$\langle v \rangle = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} \left( \frac{2k_B T}{m} \right) = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}};$$

**A12.** В твердом состоянии согласно молекулярно-кинетической теории расстояние между центрами молекул  $r$  и размер молекул  $a$  соотносятся как

- 1)  $r \approx a$       2)  $r < a$       3)  $r > a = 0$       4)  $r \gg a$

**Решение**



$r \approx a;$

**B2.** Каков объем воды, образовавшейся из кубика льда размером  $2 \times 2 \times 2 \text{ см}^3$ ? Плотности при температуре плавления считать равными  $1000 \text{ кг/м}^3$  для воды и  $900 \text{ кг/м}^3$  для льда.

**Решение**

1. Масса льда равна:

$$m_2 = \rho_2 V_2 = 900 \cdot 8 \cdot 10^{-6} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг};$$

2. Объем, занимаемый такой массой воды:

$$V_1 = m_2 \rho_1 = 7,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 7,2 \text{ см}^3;$$

### Количество вещества. Моль. Постоянная Авогадро

**A13.** Молярная масса — это

- 1) масса одной молекулы
- 2) масса одного атома
- 3) масса вещества, реагирующая с углеродом массой 12 г
- 4) масса  $6 \cdot 10^{23}$  молекул вещества

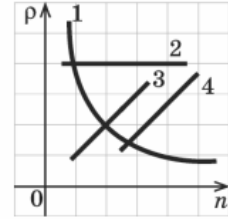
**Решение**

1. Молярная масса – это масса одного моля вещества. В одном моле любого вещества содержится  $N_A \approx 6 \cdot 10^{23}$  молекул

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{N}{N_A}; \Rightarrow \mu = \frac{m N_A}{N};$$

**A14.** Какой из графиков отражает связь между плотностью газа и концентрацией его молекул

- 1) 1      2) 2      3) 3      4) 4



**Решение**

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} \approx m_0 n; \Rightarrow y = kx; \text{ график 3.}$$

**A15.** Плотность железа примерно в 3 раза больше плотности алюминия. В алюминии количеством вещества 1 моль содержится  $N_1$  атомов. В железе количеством вещества 1 моль содержится  $N_2$  атомов. Можно утверждать, что

- 1)  $N_2 = 3N_1$   
 2)  $N_2 = N_1$   
 3)  $N_2 = \frac{N_1}{3}$   
 4)  $N_2 - N_1 = 6 \cdot 10^{23}$

**Решение**

1. В одном моле любого вещества содержится одинаковое число молекул, равное численно число Авогадро, поэтому:

$$N_2 = N_1;$$

**A16.** В баллоне находится газ, количество вещества которого равно 4 моль. Сколько (примерно) молекул газа находится в баллоне?

- 1)  $6 \cdot 10^{23}$       2)  $12 \cdot 10^{23}$       3)  $24 \cdot 10^{23}$       4)  $36 \cdot 10^{23}$

**Решение**

$$v = \frac{N_x}{N_A}; \Rightarrow N_x = vN_A \approx 4 \cdot 6 \cdot 10^{23} = 24 \cdot 10^{23};$$

**C1.** Фольгу из золота раскатывают до толщины 0,1 мкм. Плотность золота 19300 кг/м<sup>3</sup>. Оцените, сколько примерно слоев атомов золота «пробивает» частица, пролетающая сквозь фольгу.

**Решение**

1. Количество молекул  $N_x$  в заданной массе вещества  $m$ , имеющего молярную массу  $\mu$ :

$$N_x = N_A v = N_A \frac{m}{\mu};$$

2. Объём, приходящийся на одну молекулу:

$$V_1 = \frac{V}{N_x} = \frac{V\mu}{mN_A}; \quad \frac{V}{m} = \rho; \Rightarrow V_1 = \frac{\mu}{\rho N_A};$$

3. Принимая форму молекулы сферической, определим её примерный радиус  $r$ :

$$\frac{4}{3}\pi r^3 = \frac{\mu}{\rho N_A}; \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3\mu}{4\rho N_A}};$$

$$\mu_{Ag} = 197 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}; \quad \rho_{Ag} = 19,3 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; \quad N_A = 6 \cdot 10^{23};$$

$$r \approx \sqrt[3]{\frac{197 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 19,3 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{23}}} \approx 1,66 \cdot 10^{-10} \text{ м}; \quad d = 2r \approx 3,3 \cdot 10^{-10} \text{ м};$$

4. Количество слоёв атомов золота  $\xi$  в слое толщиной  $h = 10^{-7}$  м:

$$\xi = \frac{h}{d} \approx 303 \text{ слоя.}$$

**С2.** На поверхность воды капают раствор подсолнечного масла в бензине. Сначала на поверхности воды образуется круглое радужное пятно, затем бензин испаряется, пятно исчезает. Посыпание поверхности воды тальком через тонкое ситечко позволяет обнаружить границы невидимого до того масляного пятна диаметром 20 см. Оцените по этим данным размер молекул масла, если концентрация масла в бензине 0,1% (по объему), а объем капли бензина 0,05 мл. Плотности бензина и масла примерно равны.

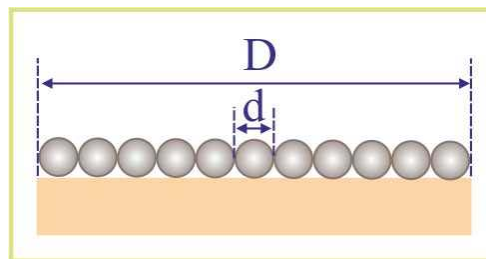
### Решение

1. Объем капли масла:

$$V_M = 0,01V_B = 5 \cdot 10^{-5} \text{ мл} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3;$$

2. Допустим, что на поверхности бензина присутствует один слой молекул масла, диаметром  $D$ , масло образует цилиндр, высота которого равна диаметру молекулы масла  $d$ , а объем равен объему капли масла:

$$V_M = \frac{\pi D^2}{4} d; \Rightarrow d \approx \frac{4V_M}{\pi D^2} \approx \frac{4 \cdot 5 \cdot 10^{-11}}{3,14 \cdot 0,04} \approx 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м};$$





## 2.2. Идеальный газ. Изопроцессы

### Идеальный газ. Связь между давлением и средней кинетической энергией молекул идеального газа

- B1.** Одноатомный газ нагревают в закрытом сосуде с неподвижными стенками. Как при этом изменятся следующие величины: концентрация молекул, давление газа? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:
- 1) увеличится      2) уменьшится      3) не изменится

#### Решение

1. Концентрация молекул:

$$n = \frac{N}{V}; \quad N = \text{const}; \quad p = \frac{\nu RT}{V}; \quad T_2 > T_1; \Rightarrow V_2 = V_1; \Rightarrow n_2 = n_1;$$

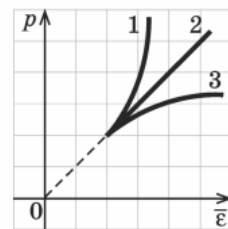
2. Давление газа:

$$p = nkT; \Rightarrow p_2 > p_1;$$

Концентрация молекул	Давление газа
<b>3</b>	<b>1</b>

- A1.** Какой график верно отражает взаимосвязь давления и средней кинетической энергии поступательного движения молекул при их постоянной концентрации в сосуде с идеальным газом?

- 1) 1  
2) 2  
3) 3  
4) ни один из графиков



#### Решение

$$\varepsilon = \frac{3}{2} k_B T; \quad p = nk_B T; \Rightarrow T = \frac{2\varepsilon}{3k_B}; \Rightarrow p = \frac{2n}{3} \varepsilon;$$

величина давления линейно зависит от средней энергии поступательного движения молекул, следовательно верным является график 2.

- A2.** При неизменном количестве газообразного гелия в сосуде средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул уменьшилась в 3 раза. При этом давление газа

- 1) уменьшилось в 9 раз  
2) уменьшилось в 3 раза  
3) уменьшилось в  $\sqrt{3}$  раз  
4) не изменилось

**Решение**

$$\varepsilon = \frac{3}{2} k_B T; \quad p = nk_B T; \quad \Rightarrow \quad T = \frac{2\varepsilon}{3k_B}; \quad \Rightarrow \quad p = \frac{2n}{3} \varepsilon;$$

$$\left. \begin{array}{l} p_1 = \frac{2n}{3} \varepsilon; \\ p_2 = \frac{2n}{3} \frac{\varepsilon}{3}; \end{array} \right\} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1}{3};$$

**A3.** Давление  $10^5$  Па создается молекулами концентрацией  $10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Какова средняя кинетическая энергия молекул?

- 1)  $10^{-20}$  Дж    2)  $10^{20}$  Дж    3)  $1,5 \cdot 10^{-20}$  Дж    4)  $10^{30}$  Дж

**Решение**

$$p = nk_B T; \quad \Rightarrow \quad T = \frac{p}{nk_B}; \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{3p}{2n} = \frac{3 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^{25}} = 1,5 \cdot 10^{-20} \text{ Дж};$$

**Уравнение состояния идеального газа**

**A4.** В одном сосуде объемом  $V$  находится  $\nu$  молей газа при абсолютной температуре  $T$  при давлении  $p$ . Во втором сосуде объемом  $2V$  находится  $2\nu$  молей газа при абсолютной температуре  $2T$ . Давление во втором сосуде равно

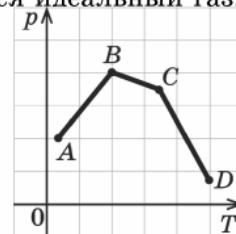
- 1)  $p$                     2)  $2p$                     3)  $4p$                     4)  $8p$

**Решение**

$$pV = \nu RT; \quad \Rightarrow \quad p = \frac{\nu RT}{V}; \quad \left. \begin{array}{l} p_1 = \frac{\nu RT}{V}; \\ p_2 = \frac{2\nu R 2T}{2V}; \end{array} \right\} \Rightarrow p_1 = 2p_2;$$

**A5.** В сосуде, закрытом поршнем, находится идеальный газ. График зависимости давления газа от температуры при изменении его состояния представлен на рисунке. Какому состоянию газа соответствует наибольшее значение объема?

- 1) A                    2) B                    3) C  
4) D



**Решение**

$$p = nk_B T = \frac{m}{V} k_B T; \quad \Rightarrow \quad V \sim \frac{T}{p}; \quad \Rightarrow \quad V_{\max} = V_D;$$

**A6.** При расширении идеального газа его объем увеличился в 2 раза, а температура уменьшилась в 2 раза. Как изменилось при этом давление газа?

- 1) увеличилось в 2 раза
- 2) уменьшилось в 4 раза
- 3) увеличилось в 4 раза
- 4) не изменилось

**Решение**

$$pV = \nu RT; \Rightarrow p = \frac{\nu RT}{V}; \left. \begin{array}{l} p_1 = \frac{\nu RT}{V} \\ p_2 = \frac{\nu RT}{4V} \end{array} \right\} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1}{4};$$

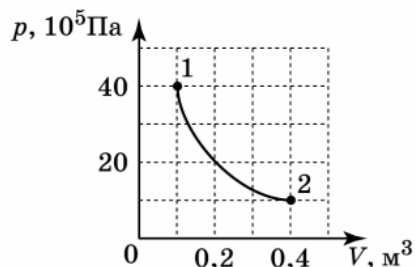
**A7.** В сосуде находится жидкий азот  $N_2$  массой 10 кг. Какой объем займет этот газ при нормальных условиях (273 К;  $10^5$  Па)?

- 1) 4,05 м<sup>3</sup>
- 2) 8,1 м<sup>3</sup>
- 3) 16,2 м<sup>3</sup>
- 4) 24,3 м<sup>3</sup>

**Решение**

$$p_0 V_0 = \frac{m}{\mu} RT_0; \Rightarrow V_0 = \frac{mRT_0}{\mu p_0} \approx \frac{10 \cdot 8,3 \cdot 273}{28 \cdot 10^{-3} \cdot 10^5} \approx 8,1 \text{ м}^3;$$

**B2.** На рисунке показан переход газа постоянной массы из состояния 1 в состояние 2. Как в этом процессе изменятся следующие величины: давление, температура, плотность газа?



Для каждой величины определите соответствующий характер изменения.

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

**Решение**

1. Как можно видеть из графика процесс изотермический  $pV = \text{const}$

Давление	Температура	Плотность
<b>2</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

**A8.** На рисунке (на следующей странице) приведен универсальный прибор для измерения параметров атмосферы, находящийся в классе с размерами  $6 \text{ м} \times 10 \text{ м} \times 4 \text{ м}$ . Чему примерно равна масса воздуха в классе, если молярная масса воздуха  $0,029 \text{ кг/моль}$ ?

- 1) 2,9 кг      2) 7 кг      3) 290 кг      4) 700 кг

**Решение**

1. Исходные данные:

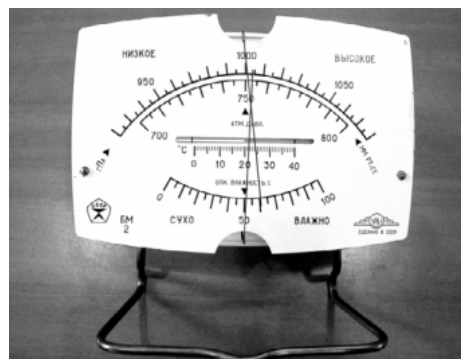
$$T \approx 293\text{К}; \quad V = 240\text{м}^3;$$

$$p_0 \approx 10^5 \text{ Па}; \quad \mu = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}};$$

2. Масса воздуха в помещении:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT; \quad \Rightarrow \quad m = \frac{p_0 V \mu}{RT};$$

$$m \approx \frac{10^5 \cdot 240 \cdot 0,029}{8,3 \cdot 293} \approx 286\text{кг};$$



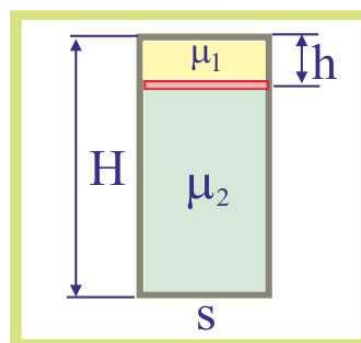
**C1.** Стоящий вертикально цилиндрический закрытый сосуд высотой  $0,8 \text{ м}$  разделен на две части невесомым, скользящим без трения тонким поршнем. На какой высоте установится поршень, если в верхней части сосуда находится гелий (молярная масса  $M_1 = 0,004 \text{ кг/моль}$ ), а в нижней — азот (молярная масса  $M_2 = 0,028 \text{ кг/моль}$ )? Массы газов в обеих частях равны.

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} pV_1 &= \frac{m}{\mu_1} RT; \\ pV_2 &= \frac{m}{\mu_2} RT; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} \frac{V_1}{V_2} &= \frac{\mu_2}{\mu_1}; & \frac{s(H-h)}{sh} &= \frac{\mu_2}{\mu_1}; \end{aligned}$$

$$(H-h)\mu_1 = \mu_2 h; \quad \mu_1 H - \mu_1 h = \mu_2 h;$$

$$\mu_1 H = h(\mu_1 + \mu_2); \quad h = \frac{\mu_1 H}{\mu_1 + \mu_2} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 0,1\text{м}.$$

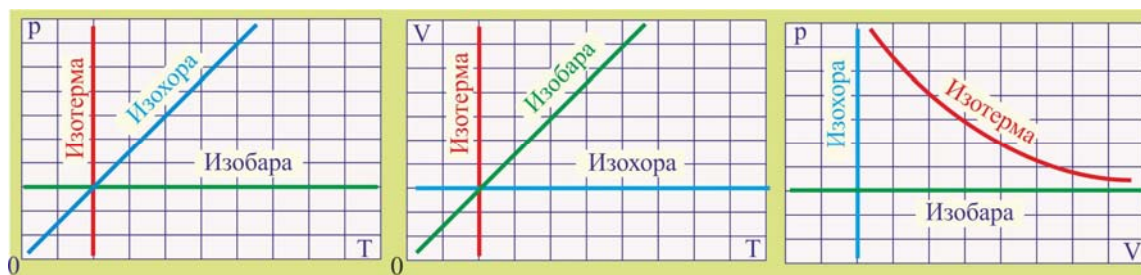


**Изопроцессы**

**A9.** При изохорном процессе у газа не меняется

- 1) температура
- 2) объем
- 3) давление
- 4) внутренняя энергия

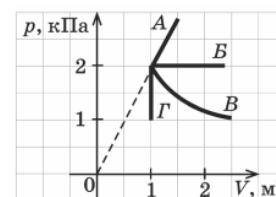
### Решение



$$V = \text{const}; \Rightarrow \left. \begin{aligned} p_1 V &= \nu R T_1; \\ p_2 V &= \nu R T_2; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2};$$

**A10.** Какой из графиков, изображенных на рисунке, соответствует процессу, проведенному при постоянном объеме газа?

- 1) А                      2) Б                      3) В                      4) Г



### Решение

1. Изохорному процессу изменения состояния идеального газа ( $V = \text{const}$ ) соответствует график Г.

**A11.** При постоянной температуре объем идеального газа уменьшился в 4 раза. Давление газа при этом

- 1) увеличилось в 2 раза  
 2) увеличилось в 4 раза  
 3) уменьшилось в 2 раза  
 4) уменьшилось в 4 раза

### Решение

1. Уравнение изотермического процесса ( $T = \text{const}$ ):

$$T = \text{const}; \Rightarrow \left. \begin{aligned} p_1 V_1 &= \nu R T; \\ \frac{p_1}{4} V_2 &= \nu R T; \end{aligned} \right\} \Rightarrow 4V_1 = V_2;$$

**A12.** При изобарном нагревании водорода массой 2 г, находившегося в начале процесса под давлением 83 кПа, его температура возросла от 200 К до 500 К. Его объем при этом

- 1) не изменился  
 2) увеличился на 0,03 м³  
 3) уменьшился в 2,5 раза  
 4) увеличился на 20 л

### Решение

$$p = \text{const}; \quad p \Delta V = \frac{m}{\mu} R \Delta T; \quad \Delta V = \frac{m R \Delta T}{p \mu} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,3 \cdot 300}{8,3 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3;$$

**Абсолютная температура.  
Связь температуры со средней  
кинетической энергией частиц вещества**

**A13.** В основе измерения изменения температуры может лежать пропорциональное температуре изменение

- 1) только объема тел
- 2) только давления газов
- 3) только электрического сопротивления материалов
- 4) любого из перечисленных параметров

**Решение**

1. Для измерения температуры могут использоваться первые три параметра, потому что:

$$pV = \nu RT; \Rightarrow \Delta T = F = \frac{p\Delta V}{\nu R}; \quad \Delta T = \frac{V\Delta p}{\nu R};$$
$$\alpha_T = \frac{\Delta R_{\text{э}}}{R_{\text{э}}\Delta T}; \Rightarrow \Delta T = \frac{\Delta R_{\text{э}}}{\alpha_T R_{\text{э}}};$$

---

**B3.** Температуру твердого тела повысили на 20 °С. Каково изменение температуры по абсолютной шкале температур?

**Решение**

$$t = T + 273,15; \Rightarrow \Delta T = \Delta t = 20\text{K};$$

---

**A14.** В результате остывания газа средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул уменьшилась в 3 раза. Абсолютная температура газа при этом уменьшилась в

- 1)  $\sqrt{3}$  раз
- 2) 3 раза
- 3) 6 раз
- 4) 9 раз

**Решение**

$$\varepsilon = \frac{3}{2}k_B T; \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \varepsilon_1 = \frac{3}{2}k_B T_1; \\ \varepsilon_1 = \frac{3}{2}k_B T_2; \end{array} \right\} \Rightarrow T_2 = \frac{T_1}{3};$$

---

**A15.** Давление 3 моль водорода в сосуде при температуре 300 К равно  $p_1$ . Каково давление 2 моль водорода в этом сосуде при температуре 400 К?

- 1)  $\frac{9}{8} p_1$
- 2)  $\frac{8}{9} p_1$
- 3)  $\frac{4}{9} p_1$
- 4)  $p_1$

**Решение**

$$\left. \begin{array}{l} p_1 V = \nu_1 R T_1 \\ p_2 V = \nu_2 R T_2 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{p_2}{p_1} = \frac{\nu_2 T_2}{\nu_1 T_1} = \frac{2 \cdot 400}{3 \cdot 300} = \frac{8}{9}; \Rightarrow p_2 = \frac{8}{9} p_1;$$


---

**B4.** Как изменяются температура, концентрация молекул под поршнем при его изотермическом сжатии?

Для каждой величины определите соответствующий характер ее изменения:

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

**Решение**

$$T = \text{const}; \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2; \quad N = \text{const}; \quad n = \frac{N}{V}; \quad V_2 < V_1; \Rightarrow n_2 > n_1;$$

Температура	Концентрация молекул
<b>3</b>	<b>1</b>

## 2.3. Термодинамика

### Тепловое равновесие. Теплопередача

**A1.** В металлическом стержне теплообмен осуществляется преимущественно путем

- 1) излучения
- 2) конвекции
- 3) теплопроводности
- 4) излучения и конвекции

#### Решение

1. Рассмотрим однородное тело в виде прямоугольного параллелепипеда на торцах которого поддерживаются температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Если температуры неодинаковы, например,  $T_1 > T_2$ , то будет протекать передача теплоты от участков с более высокой температурой к участкам с более низкой температурой. Выделяют три различных механизма передачи теплоты:

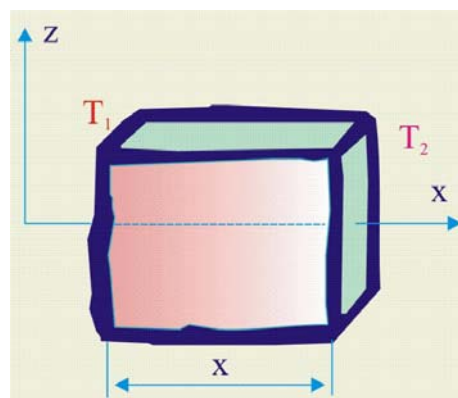
- теплопроводность;
- конвекцию;
- радиационный теплообмен.

2. **Процесс теплопроводности представляет собой непосредственную передачу кинетической энергии движения от одних структурных элементов вещества к другим.** По классической теории теплопроводности в металлах основным элементом структуры, ответственным за передачу теплоты, являются свободные электроны.

3. Будем считать, что теплоёмкость рассматриваемого вещества настолько велика, что за малый промежуток времени  $\Delta t$  температура  $T_1$  и  $T_2$  не изменяются. Количество теплоты, передаваемое через плоскую площадку  $s$  перпендикулярную оси  $x$  за время  $\Delta t$ , определил экспериментально Жан Батист Фурье (1768 – 1830)

$$\delta Q = ks\Delta t \frac{T_2 - T_1}{x},$$

где  $k$  – коэффициент теплопроводности материала стержень. Коэффициент теплопроводности является одним из основных термофизических свойств вещества, в зависимости от значения  $k$  вещества имеют то или иное промышленное применение.

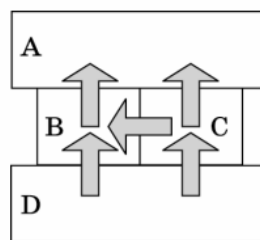




**A2.** Четыре металлических бруска положили вплотную друг к другу, как показано на рисунке. Стрелки указывают направление теплопередачи от бруска к бруску. Температуры брусков в данный момент 100 °С, 80 °С, 60 °С, 40 °С. Температуру 60 °С имеет брусок

- 1) A
- 2) B
- 3) C
- 4) D

Ответ:



### Решение

1. Определим, следуя Ньютону, взаимосвязь между температурой тела  $T$ , которую оно будет иметь по прошествии времени  $t$ . Естественно, что процесс выравнивания температуры будет определяться, прежде всего, физическими характеристиками самого охлаждающегося тела и температурой окружающей среды.

2. Введём в рассмотрение коэффициент теплоотдачи  $h$ , являющийся сложной функцией геометрических, физических и химических характеристик тела и среды, в частности, плотности, вязкости, теплоёмкости и температуропроводности.

3. Количество тепла отданного нагретым телом за промежуток времени  $dt$  определится как:

$$\delta Q = hs(T - T_2)dt.$$

Величину  $\delta Q$  можно выразить через массу тела  $m$ , удельную теплоёмкость  $c$  и уменьшение температуры  $-dT$

$$\delta Q = -cmdT.$$

Объединим уравнения:

$$hs(T - T_2)dt = -cmdT.$$

Разделим переменные и проинтегрируем уравнение

$$dt = -\frac{cm}{hs} \frac{dT}{(T - T_2)}, \quad t = -\frac{cm}{hs} \int_{T_1}^{T^*} \frac{dT}{T - T_2} = -\frac{cm}{hs} \ln \frac{T^* - T_2}{T_1 - T_2}.$$

4. Полученное уравнение является законом охлаждения Ньютона, который устанавливает промежуток времени в течение которого температура тела понизится от  $T_1$  до  $T^*$  при сохранении неизменной температуры окружающей среды. Разрешим закон охлаждения Ньютона относительно температуры  $T^*$

$$T^* = T_2 + (T_1 - T_2) \exp\left(-\frac{cm}{sh} t\right).$$

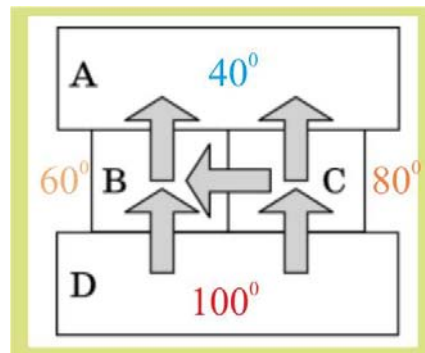
Из уравнения следует, что направление теплообмена, приведенная на схеме возможна, если тела будут иметь соответствующие температуры:

$$t_D = 100^\circ\text{C};$$

$$t_C = 80^\circ\text{C};$$

$$t_B = 60^\circ\text{C};$$

$$t_A = 40^\circ\text{C};$$



**A3.** Как соотносятся средние кинетические энергии атомов кислорода  $\bar{\epsilon}_{\text{кисл}}$  и водорода  $\bar{\epsilon}_{\text{вод}}$  в смеси этих газов в состоянии теплового равновесия, если отношение молярных масс кислорода и водорода равно 16?

- 1)  $\bar{\epsilon}_{\text{кисл}} = \bar{\epsilon}_{\text{вод}}$
- 2)  $\bar{\epsilon}_{\text{кисл}} = 16 \bar{\epsilon}_{\text{вод}}$
- 3)  $\bar{\epsilon}_{\text{кисл}} = 4 \bar{\epsilon}_{\text{вод}}$
- 4)  $\bar{\epsilon}_{\text{кисл}} = \frac{1}{4} \bar{\epsilon}_{\text{вод}}$

**Решение**

$$\langle \epsilon_0 \rangle = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} k_B T; \Rightarrow \langle \epsilon \rangle = \langle \epsilon_H \rangle;$$

**A4.** В теплоизолированном сосуде смешивают водород количеством вещества 1 моль со средней кинетической энергией молекул  $10^{-20}$  Дж и кислород количеством вещества 4 моль со средней кинетической энергией молекул  $2 \cdot 10^{-20}$  Дж. Чему будет равна средняя кинетическая энергия молекул после смешивания?

- 1)  $1,0 \cdot 10^{-20}$  Дж
- 2)  $1,2 \cdot 10^{-20}$  Дж
- 3)  $1,5 \cdot 10^{-20}$  Дж
- 4)  $1,8 \cdot 10^{-20}$  Дж

**Решение**

1. Суммарная энергия молекул:

$$\langle \epsilon_0 \rangle = 8 \langle \epsilon_H \rangle; \quad \nu_{\Sigma} = \nu_1 + \nu_2 = 5 \text{ моль};$$

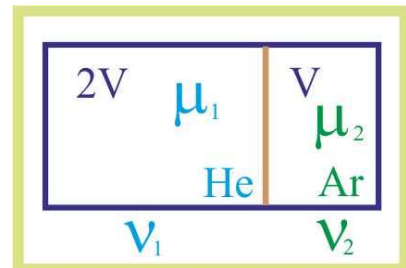
$$\langle E \rangle = \frac{1 \cdot 10^{-20} + 8 \cdot 10^{-20}}{5} = 1,8 \cdot 10^{-20} \text{ Дж};$$

**C1.** Теплоизолированный сосуд разделен теплопроводной неподвижной перегородкой на две части: объем первой части сосуда в 2 раза больше объема второй части сосуда. В первой части сосуда находятся гелий количеством вещества 2 моль, а во второй — аргон количеством вещества 2 моль. Определите отношение давления гелия к давлению аргона после установления теплового равновесия.

**Решение**

1. Система уравнений, описывающих состояние газов при заданных условиях:

$$\left. \begin{aligned} p_1 2V &= \nu_1 RT; \\ p_2 V &= \nu_2 RT; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \frac{1}{2};$$



**Количество теплоты.  
Удельная теплоемкость вещества**

**А5.** Если к твердым веществам одинаковой массой и одинаковой начальной температурой подвести одинаковое количество теплоты и они останутся твердыми, то температура вещества с большей теплоемкостью

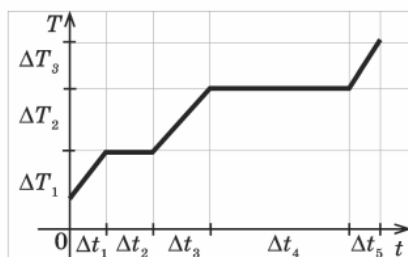
- 1) будет такой же, как у второго вещества
- 2) будет выше, чем у второго вещества
- 3) будет ниже, чем у второго вещества
- 4) может быть выше и ниже, чем у второго, в зависимости от времени теплопередачи

**Решение**

$$\left. \begin{array}{l} Q = c_1 m \Delta T_1; \\ Q = c_2 m \Delta T_2; \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \Delta T_1 = \frac{Q}{c_1 m}; \\ \Delta T_2 = \frac{Q}{c_2 m}; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{c_2}{c_1};$$

если  $c_1 > c_2$ , то  $T_1 < T_2$ .

**А6.** На рисунке представлен график зависимости абсолютной температуры  $T$  воды массой  $m$  от времени  $t$  при осуществлении теплопередачи с постоянной мощностью  $P$ . В момент времени  $t = 0$  вода находилась в твердом состоянии. Какое из приведенных ниже выражений определяет удельную теплоемкость воды в жидком состоянии по результатам этого опыта?

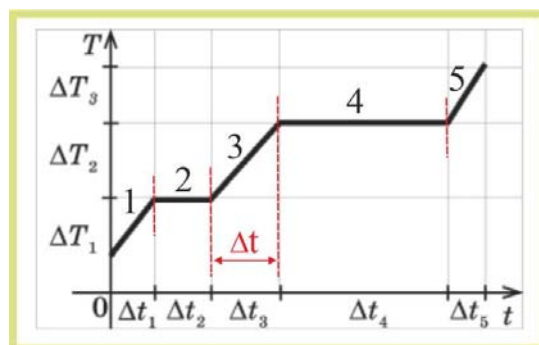


- 1)  $\frac{P\Delta t_5}{m\Delta T_3}$
- 2)  $\frac{P\Delta t_2}{m}$
- 3)  $\frac{P\Delta t_3}{m\Delta T_2}$
- 4)  $\frac{P\Delta t_4}{m}$

**Решение**

1. Классификация процессов:

- 1 – нагревание льда;
- 2 – плавление льда;
- 3 – нагревание воды;
- 4 – испарение воды;
- 5 – нагревание пара.



2. Нагревание воды происходит на участке 3, за промежуток времени  $\Delta t_3$ , при этом температура меняется на величину  $\Delta T_2$ , следовательно:

$$P\Delta t_3 = cm\Delta T_2; \Rightarrow c = \frac{P\Delta t_3}{m\Delta T_2};$$


---

**A7.** При передаче твердому телу массой  $m$  количества теплоты, равного  $Q$ , температура тела повысилась на  $\Delta T$ . Какое из приведенных ниже выражений определяет удельную теплоемкость вещества этого тела?

- 1)  $\frac{Q}{m}$       2)  $\frac{Q}{\Delta T}$       3)  $\frac{Q}{m\Delta T}$       4)  $Qm\Delta T$

**Решение**

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


---

**B1.** Бронзовый подсвечник массой 2 кг нагрели до температуры 900 К. Какое количество теплоты выделилось при остывании подсвечника до температуры 300 К? Удельная теплоемкость бронзы 420 Дж/(кг · К).

**Решение**

$$\Delta Q = cm(T_r - T_x) = 420 \cdot 2 \cdot (900 - 300) = 504 \text{ кДж};$$


---

**C2.** Для определения удельной теплоемкости вещества тело из этого вещества массой 400 г, нагретое до температуры 100 °С, опустили в железный стакан калориметра, содержащий 200 г воды. Начальная температура калориметра с водой равна 30 °С. После установления теплового равновесия температура тела, воды и калориметра оказалась равна 40 °С. Определите удельную теплоемкость вещества исследуемого тела. Масса калориметра равна 100 г, удельная теплоемкость железа равна 640 Дж/(кг · К), удельная теплоемкость воды равна 4180 Дж/(кг · К).

**Решение**

1. Исследуемое тело отдаёт теплоту, а калориметр и вода – получают, уравнение теплового баланса, таким образом, принимает вид:

$$m_T c_x (t_T - \Theta) = (\Theta - t_K)(c_B m_B + c_K m_K);$$

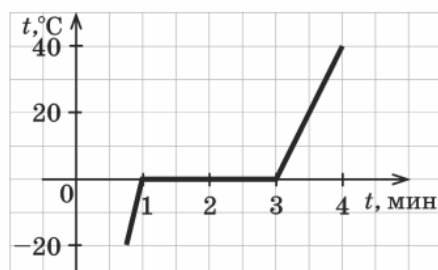
$$c_x = \frac{(\Theta - t_K)(c_B m_B + c_K m_K)}{m_T (t_T - \Theta)};$$

$$(t_T - \Theta) = 60^\circ \text{C} = 60 \text{ К}; \quad (\Theta - t_K) = (\Theta - t_B) = 10 \text{ К};$$

$$c_x = \frac{10(4180 \cdot 0,2 + 640 \cdot 0,1)}{0,4 \cdot 60} = 375 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$


---

- С3.** В калориметре нагревается лед массой  $m = 200$  г. На рисунке представлен график зависимости температуры льда от времени. Пренебрегая теплоемкостью калориметра и тепловыми потерями, определите удельную теплоту плавления льда из рассмотрения процессов нагревания льда и воды (теплоемкость льда  $c_1 = 2100$  Дж/(кг · К), теплоемкость воды  $c_2 = 4200$  Дж/(кг · К)).



### Решение

1. Удельная теплота плавления льда, выраженная через мощность источника  $P$  и время плавления  $\tau_{\text{пл}} = 2$  мин = 120 с:

$$P\tau_{\text{пл}} = m\lambda; \Rightarrow \lambda = \frac{P\tau_{\text{пл}}}{m};$$

2. Мощность нагревателя через заданные графиком параметры нагревания воды, протекающего в течение последней минуты  $\tau_{\text{н}} = 60$  с, при этом вода нагревается на  $\Delta T = 40$  К:

$$Q = c_{\text{в}}m\Delta T; \Rightarrow P = \frac{Q}{\tau_{\text{н}}} = \frac{c_{\text{в}}m\Delta T}{\tau_{\text{н}}}; \Rightarrow \lambda = \frac{\tau_{\text{пл}}}{\tau_{\text{н}}}c_{\text{в}}\Delta T = \frac{120}{60}4200 \cdot 40 \approx 3,36 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}};$$

### Работа в термодинамике

- А8.** Совершив работу, можно изменить внутреннюю энергию

- 1) только газа
- 2) только жидкости
- 3) только твердого тела
- 4) любого тела

### Решение

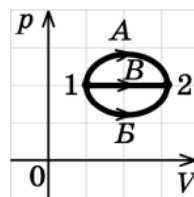
1. Изменение внутренней энергии зависит от числа степеней свободы молекулы  $i$ , количества вещества  $\nu$  и изменения температуры  $\Delta T$ . Наиболее простое уравнение изменения внутренней работы имеет для газообразного состояния:

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

но, в принципе, совершив работу, т.е. изменив температуру вещества, достигается изменение внутренней энергии как в газообразном, так и в жидком и твердом состоянии.

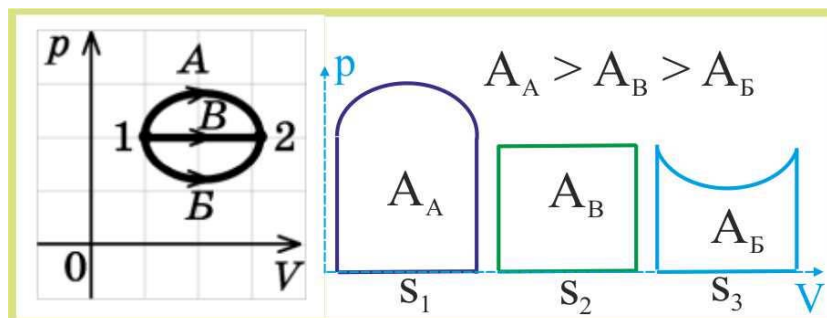
**A9.** В каком из процессов перехода идеального газа из состояния 1 в состояние 2, изображенном на  $p - V$  — диаграмме (рис.), газ совершает наибольшую работу?

- 1) A
- 2) B
- 3) B
- 4) Во всех трех процессах газ совершает одинаковую работу.



Ответ:

**Решение**



**A10.** В сосуде вместимостью  $3V$  под поршнем находится газ. Газ сжимают, прикладывая постоянную силу к поршню, один раз до объема  $2V$ , второй раз до объема  $V$ . Отношение работ, совершенных внешними силами,  $\frac{A_V}{A_{2V}}$  равно

- 1) 1
- 2) 0,5
- 3) 1,5
- 4) 3

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} A_V &= p(3V - 2V); \\ A_{2V} &= p(3V - V); \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{A_V}{A_{2V}} = 0,5;$$

**B2.** Объем газа, расширяющегося при постоянном давлении 100 кПа, увеличился на 2 л. Чему равна работа, совершенная газом в этом процессе?

**Решение**

$$A = p\Delta V = 1 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 200 \text{ Дж};$$

## Внутренняя энергия

**A11.** Внутренняя энергия монеты уменьшается, если

- 1) ее нагреть
- 2) сообщить ей большую скорость
- 3) поднять монету над поверхностью Земли
- 4) положить монету в холодильник

**Решение**

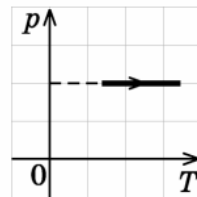
$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T; \Rightarrow \Delta U = f(\Delta T);$$

---

**A12.** Внутренняя энергия газа в процессе, изображенном на рисунке

- 1) не изменяется
- 2) увеличивается
- 3) уменьшается
- 4) равна нулю

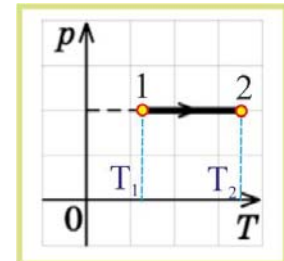
Ответ:



**Решение**

$$U = \frac{i}{2} \nu R T; \Rightarrow U = f(T);$$

$$T_2 > T_1; \Rightarrow \Delta U = U_2 - U_1 > 0;$$



**A13.** Как изменится внутренняя энергия идеального газа при повышении его температуры в 3 раза при неизменном давлении?

- 1) увеличится в 9 раз
- 2) увеличится в 3 раза
- 3) увеличится в раз
- 4) не изменится

**Решение**

$$U_1 = \frac{3}{2} \nu R T; \quad U_3 = \frac{3}{2} \nu R 3T; \Rightarrow U_2 = 3U_1;$$

---

**A14.** Идеальный одноатомный газ находится в сосуде вместимостью 0,6 м<sup>3</sup> под давлением 2 · 10<sup>3</sup> Па. Чему равна внутренняя энергия газа?

- 1) 1,2 кДж
- 2) 1,8 кДж
- 3) 2,4 кДж
- 4) для ответа не хватает данных

**Решение**

$$p \Delta V = \nu R \Delta T; \quad \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T; \Rightarrow \Delta U = \frac{3}{2} p \Delta V = 1,8 \text{ кДж};$$

---

## Первый закон термодинамики

**A15.** Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при его изотермическом сжатии?

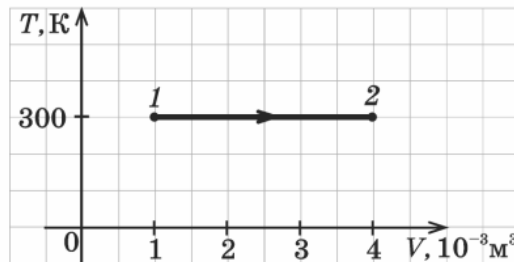
- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) увеличивается или уменьшается в зависимости от скорости изменения объема
- 4) не изменяется

**Решение**

$$A_{1,2} = \nu R \Delta T; \quad \Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T; \quad T = \text{const}; \quad \Rightarrow \quad \Delta U = \text{const};$$


---

**A16.** На TV-диаграмме показан процесс изменения состояния идеального одноатомного газа. Начальное давление газа было равно  $10^6$  Па. Количество теплоты, полученное газом, равно 3 кДж. Чему равна работа, совершенная газом?



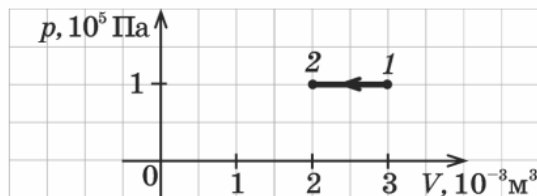
- 1) 1 кДж      2) 3 кДж      3) 4 кДж      4) 7 кДж

**Решение**

$$\Delta Q = \delta A + dU; \quad T = \text{const}; \quad \Rightarrow \quad dU = 0; \quad \Rightarrow \quad A = Q = 3 \text{ кДж};$$


---

**A17.** На рисунке приведен график зависимости давления от объема при изменении состояния идеального одноатомного газа. Газ отдал количество теплоты, равное 250 кДж. Внутренняя энергия газа при этом



- 1) не изменилась
- 2) уменьшилась на 50 кДж
- 3) уменьшилась на 150 кДж
- 4) уменьшилась на 350 кДж



### Решение

1. В соответствии с первым началом термодинамики

$$\Delta U = Q - A = Q - p\Delta V = 2,5 \cdot 10^3 - 10^5 \cdot 10^{-3} = 150 \text{ кДж},$$

внутренняя энергия газа уменьшилась на 150 кДж.

---

**A18.** В ходе сжатия газа его температура уменьшилась. При этом о работе  $A$ , совершенной газом, и изменении внутренней энергии  $\Delta U$  газа можно утверждать, что

- 1)  $\Delta U > 0, A < 0$
- 2)  $\Delta U < 0, A < 0$
- 3)  $\Delta U > 0, A < 0$
- 4)  $\Delta U < 0, A > 0$

### Решение

1. Внутренняя энергия:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T; \Rightarrow \Delta T = T_2 - T_1 < 0; \Rightarrow \Delta U < 0;$$

2. В данном случае работа производится над газом, поэтому  $A < 0$ .

---

**A19.** Газ получил количество теплоты, равное 300 Дж, и совершил работу, равную 400 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия газа, если его масса постоянна?

- 1) увеличилась на 100 Дж
- 2) увеличилась на 700 Дж
- 3) уменьшилась на 100 Дж
- 4) уменьшилась на 700 Дж

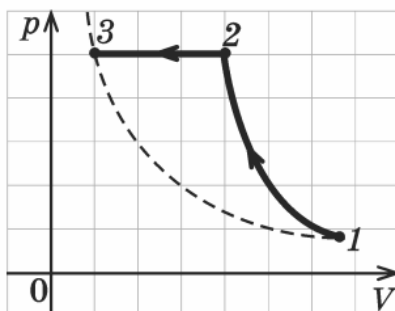
### Решение

1. Величина произведённой газом работы больше полученной теплоты, часть работы совершается за счёт уменьшения внутренней энергии газа:

$$-\Delta U = A - Q = -100 \text{ Дж};$$

---

**C4.** Идеальный одноатомный газ сжимается сначала адиабатно, а затем изобарно. Конечная температура газа равна начальной (рис.). При адиабатном сжатии газа внешние силы совершили работу, равную 6 кДж. Чему равна работа внешних сил за весь процесс  $1 - 2 - 3$ ?



### Решение

1. Суммарная работа:

$$A_{1,2,3} = A_{1,2} + A_{2,3}$$

2. Работа при изобарном сжатии газа:

$$A_{2,3} = \nu R \Delta T_{2,3};$$

2. Адиабатный процесс изменения состояния протекает без теплообмена с внешней средой  $\delta Q_{1,2} = 0$ , поэтому уравнение первого начала термодинамики имеет вид:

$$0 = \Delta U_{1,2} + A_{1,2}; \Rightarrow \Delta U_{1,2} = A_{1,2} = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1); \quad T_1 = T_3;$$

$$\Delta U_{1,2} = \frac{3}{2} \nu R \Delta T_{2,3}; \Rightarrow \Delta T_{2,3} = \frac{2}{3} \frac{A_{1,2}}{\nu R};$$

$$A_{1,2,3} = \frac{3}{3} A_{1,2} + \frac{2}{3} A_{1,2} = \frac{5}{3} A_{1,2} = 10 \text{ кДж};$$

### Второй закон термодинамики и его статистическое истолкование

**A20.** Теплопередача всегда происходит от тела с большей

- 1) массой к телу с меньшей массой
- 2) теплоемкостью к телу с меньшей теплоемкостью
- 3) температурой к телу с меньшей температурой
- 4) теплопроводностью к телу с меньшей теплопроводностью

### Решение

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

**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 счёт энергии внешнего источника.

**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».

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».

**A21.** В левой половине сосуда находится  $10^{20}$  молекул газа, а в правой половине  $2 \cdot 10^{20}$  молекул. Сколько примерно молекул окажется в левой половине сосуда через длительное время после того, как уберут перегородку (на рисунке показана черным) между двумя половинами сосуда?

- 1)  $10^{20}$
- 2)  $1,5 \cdot 10^{20}$
- 3)  $2 \cdot 10^{20}$
- 4)  $3 \cdot 10^{20}$



### Решение

1. При удалении перегородки в соответствии с принципом минимизации энергии, как того требует второе начало термодинамики, начнётся самопроизвольный процесс перемешивания молекул с целью выравнивания концентрации, произойдёт полное выравнивание концентрации и температуры, при этом:

$$N_x = \frac{N_1 + N_2}{2} = 1,5 \cdot 10^{20};$$

**C5.** Теплоизолированный сосуд вместимостью  $V = 2 \text{ м}^3$  разделен пористой перегородкой на две равные части. Атомы гелия могут свободно проникать через поры в перегородке, а атомы аргона — нет. В начальный момент в одной части сосуда находится гелий массой  $m_1 = 1 \text{ кг}$ , а в другой — аргон массой  $m_2 = 1 \text{ кг}$ . Средняя квадратичная скорость атомов аргона и гелия одинакова и составляет  $u = 500 \text{ м/с}$ . Определите температуру гелий-аргоновой смеси после установления равновесия в системе.

### Решение

1. Количество вещества в сосуде:

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 = \frac{m}{\mu_1} + \frac{m}{\mu_2}; \quad \frac{2m}{\mu} = \frac{m}{\mu_1} + \frac{m}{\mu_2}; \quad \mu = \frac{2\mu_1\mu_2}{\mu_1 + \mu_2};$$

2. Средняя квадратичная скорость молекул:

$$u = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}; \quad \Rightarrow \quad T = \frac{u^2\mu}{3R}; \quad T = \frac{2}{3R} \frac{\mu_1\mu_2}{\mu_1 + \mu_2} u^2;$$

3. Температура гелий-аргоновой смеси молекул:

$$T \approx \frac{2}{25} \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{44 \cdot 10^{-3}} 250 \cdot 10^3 \approx 72,7\text{К};$$

**Тепловые машины.  
Преобразования энергии в тепловых машинах.  
КПД тепловой машины**

**A22. Тепловая машина**

- 1) производит механическую работу по увеличению внутренней энергии тела
- 2) производит тепло
- 3) совершает механическую работу за счет подводимого количества теплоты
- 4) производит электроэнергию за счет совершения работы

**Решение**

1. Рассмотрим идеальный газ, находящийся в цилиндрическом сосуде под массивным поршнем. 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.



2. В стадии нагревания изменение состояния газа (рабочего тела) можно охарактеризовать на  $pV$  – диаграмме кривой 1 – а – 2. Первое начало термодинамики позволяет записать следующее уравнение подобающее рассматриваемой ситуации

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

3. Если в верхней точке своей прямолинейной траектории поршень соприкоснётся с телом, температура которого ниже температуры газа (холодильником), произойдёт охлаждение газа, что приведёт к уменьшению его объёма. Газ из состояния 2 по кривой 2 – b – 1 вернётся в исходное состояние 1, при этом

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

Совмещая уравнения, получим:

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

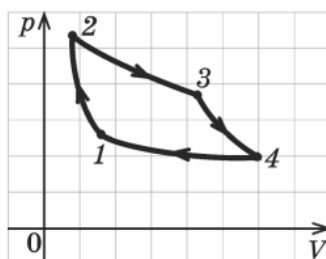
Уравнение демонстрирует, что рассматриваемое устройство совершило круговой процесс, при котором, нагреватель отдал рабочему телу тепло  $Q_1$ , а холодильник приобрёл тепло в количестве  $Q_2$ . Экономический коэффициент полезного действия тепловой машины можно представить традиционным образом

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

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».

5. 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.

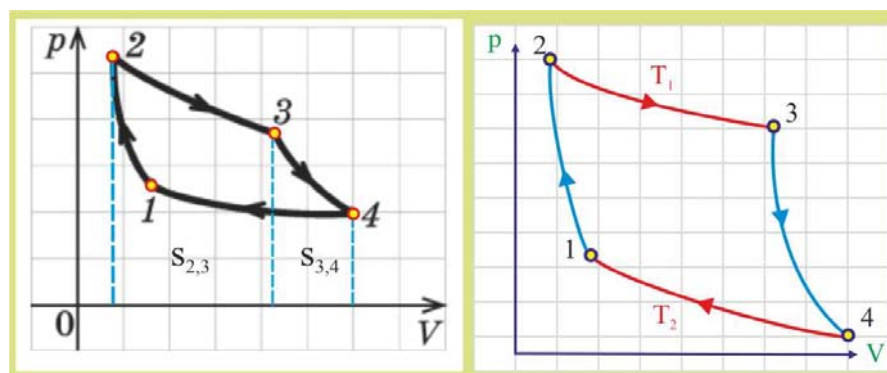
**A23.** Тепловая машина, в которой рабочим телом является газ, работает так, что состояние рабочего тела меняется циклически (см. рис.). Участки 1—2 и 3—4 — адиабатные процессы, а 2—3 и 4—1 изотермические. На каком участке рабочее тело машины получает некоторое количество теплоты от нагревателя?



- 1) 1—2      2) 2—3      3) 3—4      4) 4—1

### Решение

1. 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 необоснованные. Научный фундамент был ещё не создан.



2. 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.

3. Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат. Процесс перехода из состояния 2 в состояние 3 представляет собой изотермическое расширение рабочего тела, при котором газ находится в тепловом контакте с нагревателем, обладающим температурой  $T_1$ . Переход из состояния 3 в состояние 4, сопровождается дальнейшим адиабатическим увеличением объёма при изоляции от окружающей среды. Переход из точки 4 в точку 1 представляется изотермическим сжатием газа, и, наконец, возвращение системы в исходную точку 2 протекает в виде адиабатического сжатия.

4. 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

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

Интегрируя уравнение  $\Delta Q_1$ , получим

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

Аналогичные уравнения запишем для перехода  $C \rightarrow D$

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

5. В рассматриваемых процессах  $V_4 > V_3$  и  $V_2 < V_1$ , из чего следует, что  $\Delta Q_1 > 0$ ,  $\Delta Q_2 < 0$ . **Максимальное количество теплоты газ, таким образом, получает на переходе  $2 \rightarrow 3$ .**

Переходы  $3 \rightarrow 4$  и  $1 \rightarrow 2$  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, получим величину максимально возможную величину коэффициента полезного действия тепловой машины, работающей по циклу Карно

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

6. Уравнению КПД можно придать другой вид:

$$\eta = \frac{T_H - T_X}{T_H},$$

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 парово-

зы, потому что температура пара не может увеличиваться беспрестанно, а вот в двигателях внутреннего сгорания температура при воспламенении выше, следовательно, они более эффективны, хотя, уравнение не позволяет увеличить коэффициент полезного действия более  $\eta \leq 40\%$ .

7. 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. 1 приведены значения коэффициента полезного действия двигателей различных типов.

Таблица 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

8. 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.

9. В случае с источниками энергии, человечество было попросту избаловано избытком 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.

10. 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:  $C_nH_m$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ , другими словами  $C_xH_y$ .

11. 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.

**В3.** В ходе работы паровой турбины в котле образуется пар за счет сжигаемого топлива. Пар по подводящему трубопроводу направляется на лопатки турбины. Отражаясь от лопаток, он меняет свое направление. За счет этого турбина раскручивается, а отработавший пар переходит в отводящий трубопровод и далее в змеевики, в которых конденсируется за счет охлаждения змеевика атмосферным воздухом или водой внешних источников. Образовавшаяся вода вновь поступает в котел.

Установите соответствие между этапами преобразования одного вида энергии в другой и техническими устройствами, в которых оно реализуется. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные буквы под соответствующими цифрами.

### Решение

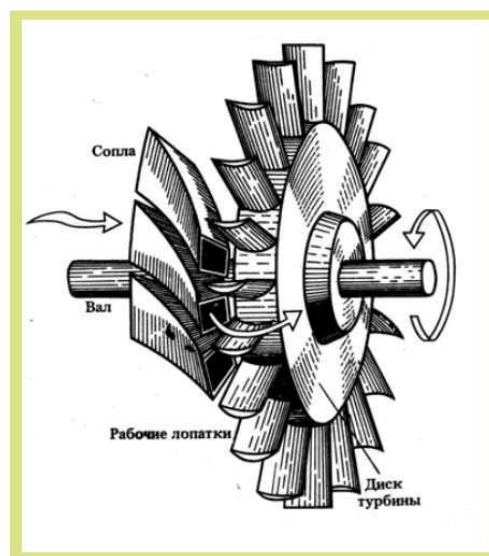
1. Пар в котле содержится при высоких значениях давления и температуры, что обеспечивает большие значения его внутренней энергии

$$U \approx \frac{i}{2} \nu RT,$$

в соплах турбины (подводящие трубопроводы) выполненные, как правило, в форме сопел Лавалля, происходит трансформация внутренней энергии в кинетическую энергию турбулентной струи

$$U \rightarrow \frac{mv^2}{2};$$

2. Струя пара из сопла направляется на лопатки турбины, которые представляют собой аэродинамическое сопротивление, при обтекании которого возникают силы с тангенциальной составляющей. Тангенциальная составляющая сил аэродинамического сопротивления обладает моментом относительно оси вращения турбины, что приводит к её раскручиванию.



ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ	ЧАСТЬ УСТАНОВКИ С ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ
А) внутренняя энергия пара в механическую энергию пара	1) подводящий трубопровод
Б) механическая энергия и внутренняя энергия пара в механическую энергию колеса турбины с лопатками	2) колесо турбины с лопатками
	3) отводящий трубопровод
	4) топка котла

А	Б
1	2



**A24.** Как связаны между собой модули количеств теплоты, передаваемых за цикл в ходе теплообмена между рабочим телом и нагревателем  $|Q_{\text{нагр}}|$ , между рабочим телом и холодильником  $|Q_{\text{хол}}|$  и работы  $A$ , которую рабочее тело совершает за цикл?

- 1)  $|Q_{\text{нагр}}| - |Q_{\text{хол}}| = A$
- 2)  $|Q_{\text{нагр}}| + |Q_{\text{хол}}| = A$
- 3)  $|Q_{\text{нагр}}| + A = |Q_{\text{хол}}|$
- 4)  $|Q_{\text{хол}}| - |Q_{\text{нагр}}| = A$

**Решение**

1. Коэффициент полезного действия тепловой машины определяется с соответствии с теоремой Карно:

$$\eta = \frac{Q_{\text{H}} - Q_{\text{X}}}{Q_{\text{H}}};$$

2. Работа, производимая тепловой машиной:

$$A = \eta Q_{\text{H}} = Q_{\text{H}} - Q_{\text{X}};$$

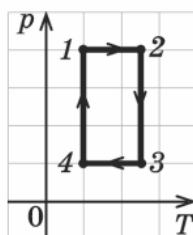


**B4.** КПД идеального теплового двигателя 40%. Чему равна температура нагревателя, если температура холодильника 27 °С?

**Решение**

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{X}}}{T_{\text{H}}}; \Rightarrow T_{\text{H}} = \frac{T_{\text{X}}}{1 - \eta} = \frac{300}{0,6} = 500\text{K};$$

**A25.** Рабочим телом тепловой машины является газ, который в ходе работы меняет свое состояние циклически, как показано на рисунке. Какой вывод о соотношении работы, совершаемой газом на участках 1–2 и 3–4, можно сделать на основании этой диаграммы?



- 1)  $A_{1-2} = A_{3-4}$
- 2)  $A_{1-2} > A_{3-4}$
- 3)  $A_{1-2} < A_{3-4}$
- 4) для получения ответа не хватает данных

**Решение**

1. Приведенный цикл состоит из двух изотерм 2 – 3 и 4 – 1 и двух адиабат 1 – 2 и 3 – 4.

2. Работа, производимая постоянной массой газа в адиабатическом процессе, зависит только от разности температур:

$$A = \frac{mR}{\zeta - 1} \Delta T,$$

где  $\zeta$  – показатель адиабаты газа

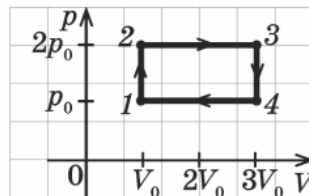
$$\zeta = \frac{i + 2}{i},$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы.

3. Поскольку:

$$T_2 - T_1 = T_3 - T_4; \Rightarrow A_{1,2} = A_{3,4};$$

**С6.** Рабочим телом тепловой машины является гелий, который в ходе работы меняет свое состояние циклически, как показано на рисунке. Каков КПД такой тепловой машины?



### Решение

1. КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{A_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4}}{Q_{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3}} = \frac{A_{\Sigma}}{Q_{13}};$$

2. Работа цикла численно равна площади геометрической фигуры, образованной процессом в  $pV$  координатах:

$$A_{\Sigma} = 2p_0 V_0;$$

3. Полученная теплота  $Q_{13}$  расходуется на совершение работы и изменение внутренней энергии газа:

$$Q_{13} = \Delta U_{13} + A_{13} = \Delta U_{13} + A_{23};$$

4. Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U_{13} = \frac{3}{2} \nu RT_3 - \frac{3}{2} \nu RT_1 = \frac{3}{2} 2p_0 3V_0 - \frac{3}{2} p_0 V_0 = \frac{15}{2} p_0 V_0;$$

5. Работа на участке 2 – 3:

$$A_{23} = p_{23} \Delta V = 4p_0 V_0;$$

6. КПД тепловой машины:

$$\eta = \frac{A_{\Sigma}}{Q_{13}} = \frac{2p_0 V_0}{4p_0 V_0 + \frac{15}{2} p_0 V_0} = \frac{2}{11,5} = 0,174 \text{ (17\%);}$$

## 2.4. Агрегатные состояния вещества

### Испарение и конденсация. Кипение жидкости

**A1.** Жидкости могут испаряться

- 1) только при точке кипения
- 2) только при температуре, большей точки ее кипения
- 3) только при температуре, близкой к температуре ее кипения
- 4) при любых внешних условиях

#### Решение

1. Переход веществ из жидкого или твёрдого состояния в газообразное состояние, именуемый парообразованием (испарением), возможен с разной степени интенсивности практически **при любых внешних условиях**. Вследствие теплового движения молекул, они могут покидать границы жидкости или твёрдого тела при любых температурах, однако при высоких температурах скорости молекулярного движения соответственно выше, что увеличивает количество молекул, способных перемещаться за пределы поверхностных слоёв. Парообразование со свободной поверхности жидкости называется испарением, испарение с поверхности твёрдого тела называется сублимацией или возгонкой.

2. Для перехода молекул из жидкого состояния в парообразное они должны преодолеть силы межмолекулярного сцепления и внешнее давление. Это становится возможным при определённой величине кинетической энергии молекул в фазе их поступательного движения. Результатом испарения является охлаждение жидкости, потому что каждая молекула, покидающая объём уносит с собой часть кинетической энергии. Таким образом, для организации процесса испарения при фиксированной температуре к жидкости должно подводиться тепло от внешнего источника.

Количественно процесс парообразования характеризуется физической величиной, называемой удельной теплотой парообразования  $L$ , показывающей какое количество тепла при постоянной температуре необходимо подвести, чтобы обратить в пар 1 кг жидкости. Для превращения в пар жидкости массой  $m$ , таким образом, требуется следующее количество тепла  $\delta Q$

$$\delta Q = \lambda m,$$

где  $\lambda$  – удельная теплота парообразования,  $m$  – масса жидкости. При понижении температуры пара он способен превращаться в жидкость, такой процесс называется конденсацией. Процесс конденсации начинается при температурах, ниже некоторой критической, характерной для данного вещества. Каждое вещество характеризуется температурой, при которой не обнаруживается различий между жидкой и паровой фазой. Такие температуры называются критическими.

---

**A2.** Часть воды частично испарилась из чашки при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Температура воды, оставшейся в чашке

- 1) увеличилась
- 2) уменьшилась
- 3) не изменилась
- 4) увеличилась или уменьшилась, в зависимости от скорости испарения

**Решение**

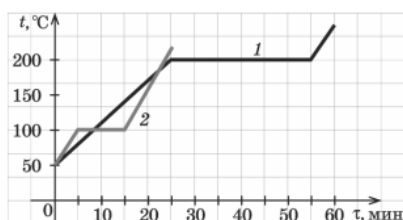
1. Жидкости, вследствие испарения, могут переходить в газообразное состояние при температурах ниже температуры кипения. Энергия, необходимая для преодоления поверхностных сил (теплота испарения) образуется за счёт уменьшения внутренней энергии жидкости, что приводит к понижению её температуры.

---

**A3.** На рисунке показаны кривые нагревания двух веществ, которые в начале нагревания находятся в жидком состоянии. Мощность нагревателя и его КПД можно считать постоянными.

Отношение температур кипения первого вещества к температуре кипения второго равно

- 1) 1/3
- 2) 1/2
- 3) 2
- 4) 3



**Решение**

$$T_1 = 200 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad T_2 = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \quad \Rightarrow \zeta = \frac{T_1}{T_2} = 2;$$


---

**A4.** Температура в долине 20 °С, в горах 10 °С. Атмосферное давление в долине 760 мм. рт. ст., в горах 530 мм. рт. ст. При какой температуре закипит вода в горах, если ее греть в открытом сосуде? Для ответа воспользуйтесь таблицей на стр. 86.

- 1) 50 °С
- 2) 90 °С
- 3) 100 °С
- 4) 200 °С

**Решение**

1. Следует отметить, что величина температуры кипения  $T_S$  помимо внешних условий, определяется физическим состоянием жидкости. Дело в том, что реальные жидкости не гомогенны, в объёме жидкости содержатся ядра конкурентной фазы в виде твёрдых взвешенных частиц и микроскопических газовых включений, которые являются центрами парообразования при нагревании жидкости. В частности, темпе-

ратура вскипания воды  $T_s \cong 373 \text{ К}$  по недоразумению в прошлые времена была предложена в качестве физической константы, завидное постоянство этой величины ввело учёных в заблуждение.

2. Как потом оказалось, в воде растворено достаточно большое количество воздуха, который существует ко всему прочему в свободном состоянии, в виде мельчайших полостей, которых по здравому смыслу, там быть не должно. Более крупные полости должны всплывать на поверхность. Силу Архимеда никто не отменял. Мелкие воздушные пузырьки должны растворяться вследствие диффузии молекул газа из полости в жидкость.

3. Однако, оказалось, что даже в специально подготовленных, тщательнейшим образом отфильтрованных образцах воды, подвергнутых длительному обжатию значительными внешними давлениями, ядра конкурентной фазы сохраняются. Постоянство температуры вскипания воды демонстрирует её свойство быть во всех мыслимых внешних обстоятельствах гетерогенной, содержать в достаточно больших количествах долго существующие ядра конкурентной паровой фазы.

### Насыщенные и ненасыщенные пары

**А5.** В сосуде, содержащем только водяной пар и воду, при движении поршня давление не меняется. Температура при этом

- 1) не изменяется
- 2) увеличивается
- 3) уменьшается
- 4) может как уменьшаться, так и увеличиваться

### Решение

1. Если при движении поршня давление не меняется, то имеют место два процесса, процесс испарения и конденсации, температура при этом приблизительно будет постоянной. При испарении температура жидкости понижается, а при конденсации увеличивается. Из уравнения Клапейрона – Клаузиуса следует, что:

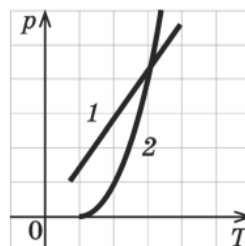
$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T\Delta v}; \Rightarrow dp = \frac{\lambda}{T\Delta v} dT; dp = 0; \Rightarrow T = \text{const},$$

где  $v$  – изменение удельного объёма при фазовых переходах первого рода.

**А6.** На рисунке изображены графики зависимости давления паров для двух разных жидкостей от температуры в сосуде постоянного объема. Какой из графиков относится к насыщенному пару, а какой — к ненасыщенному пару?

- 1) 1 — ненасыщенный пар;  
2 — насыщенный пар
- 2) 1 — насыщенный пар;  
2 — ненасыщенный пар
- 3) и 1, и 2 — насыщенные пары
- 4) и 1, и 2 — ненасыщенные пары

Ответ:



### Решение

1. Для ненасыщенного пара справедливо уравнение Клапейрона – Менделеева:

$$pV = \nu RT; \Rightarrow p = \frac{\nu R}{V} T = kT; \text{ линейная зависимость } 1;$$

---

**A7.** Пусть  $W_1$  — число молекул, покидающих поверхность жидкости в единицу времени при равновесии пара и жидкости,  $W_2$  — число молекул, попадающих за то же время из пара в жидкость. Тогда

$$1) \frac{W_1}{W_2} > 1 \quad 2) \frac{W_1}{W_2} < 1 \quad 3) \frac{W_1}{W_2} \approx 1 \quad 4) \frac{W_1}{W_2} \ll 1$$

### Решение

1. В состоянии динамического равновесия количество испаряющихся в единицу времени с единицы поверхности жидкости равно количеству конденсирующихся молекул за то же время на той же площади

$$W_1 \approx W_2;$$

---

**B1.** В закрытом сосуде вместимостью 1 л при температуре 100 °С находятся в равновесии пары воды и капля воды. Чему равна масса паров воды в сосуде, если давление насыщенного пара воды при 100 °С равно 100 кПа?

### Решение

$$pV = \frac{m}{\mu} RT; \Rightarrow m = \frac{pV\mu}{RT} \approx \frac{10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{8,3 \cdot 373} \approx 5,81 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \approx 0,6 \text{ г};$$

---

### Влажность воздуха

**A8.** При какой влажности воздуха человек легче переносит высокую температуру воздуха и почему?

- 1) при низкой, так как при этом легче идет испарение жидкости с поверхности тела человека
- 2) при низкой, так как при этом труднее идет испарение жидкости с поверхности тела человека
- 3) при высокой, так как при этом легче идет испарение жидкости с поверхности тела человека
- 4) при высокой, так как при этом труднее идет испарение жидкости с поверхности тела человека

### Решение

1. При низкой влажности пар ненасыщенный, поэтому интенсивность испарения высокая, что обеспечивает большее понижение температуры тела, с поверхности которого происходит испарение.

---

**A9.** На рисунке показан прибор для измерения влажности в комнате. Чему равна влажность воздуха в этой комнате?

- 1) 22/15
- 2) 15/22
- 3) Для ответа на вопрос необходима таблица зависимости давления насыщенных паров от температуры.
- 4) Для ответа на вопрос необходима психрометрическая таблица.

### Решение

1. Устройство называется психрометрический гигрометр. Для определения относительной влажности необходимо установить разность показаний сухого и влажного термометра и по специальной таблице найти относительную влажность воздуха.



2. В данном случае: показания сухого термометра  $t_c \approx 22$  °C, температура мокрого термометра  $t_m \approx 15$  °C, следовательно  $\Delta t \approx 7$  °C, относительная влажность воздуха  $\varphi \approx 47\%$ .

**A10.** Относительная влажность воздуха в комнате равна 25%.

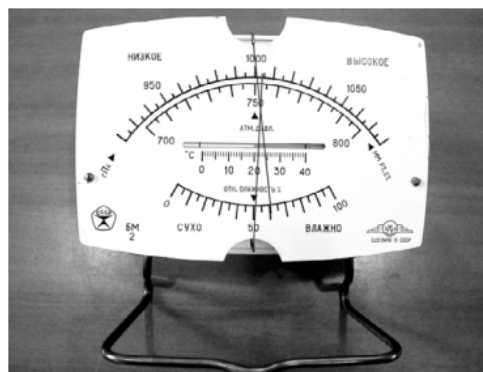
Каково соотношение парциального давления  $p$  водяного пара в комнате и давления  $p_n$  насыщенного водяного пара при такой же температуре?

- 1)  $p$  меньше  $p_n$  в 4 раза
- 2)  $p$  больше  $p_n$  в 4 раза
- 3)  $p$  меньше  $p_n$  на 25%
- 4)  $p$  больше  $p_n$  на 25%

### Решение

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{нп}}} = \frac{1}{4}; \Rightarrow p_{\text{п}} = \frac{p_{\text{нп}}}{4};$$

- С1. На рисунке приведен универсальный прибор для измерения параметров атмосферы. Воспользуйтесь приведенной ниже таблицей зависимости давления насыщенного пара воды от температуры и определите содержание паров в кубическом метре воздуха.



**Давление насыщенного водяного пара при различных значениях температуры**

$t$ °C	$p_n$ , кПа	$t$ °C	$p_n$ , кПа
6	0,933	17	1,933
7	1,000	18	2,066
8	1,006	19	2,199
9	1,146	20	2,333
10	1,226	21	2,493
11	1,306	22	2,639
12	1,399	23	2,813
13	1,492	24	2,986
14	1,599	25	3,173
15	1,706	50	12,6
16	1,813	90	70,1

### Решение

1. Исходные данные по показаниям прибора:

$$T \approx 293\text{K}; \quad \varphi \approx 0,5;$$

2. Давление насыщенных паров воды по таблице:  $p_{\text{НП}} = 2333$  Па.

3. Давление паров воды:

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{НП}}}; \quad \Rightarrow \quad p = \varphi p_{\text{НП}} \approx 1,17 \cdot 10^3 \text{ Па};$$

4. Из уравнения состояния пара:

$$pV = \frac{m}{\mu}RT; \quad \Rightarrow \quad \rho_{\text{п}} = \frac{p\mu}{RT} \approx \frac{1,17 \cdot 10^3 \cdot 18 \cdot 10^{-3}}{8,3 \cdot 293} \approx 8,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

5. В одном кубическом метре воздуха содержится  $m \approx 8,7$  г паров воды.



## Кристаллические и аморфные тела

- A11.** При нагревании двух твердых тел из кристаллического (I) и аморфного (II) вещества переход в жидкое состояние
- 1) происходит резко при достижении определенной температуры и для I, и для II тела
  - 2) происходит резко при достижении определенной температуры только для I тела
  - 3) происходит резко при достижении определенной температуры только для II тела
  - 4) происходит постепенно для обоих тел, сопровождаясь повышением температуры смеси жидкого и твердого вещества

### Решение

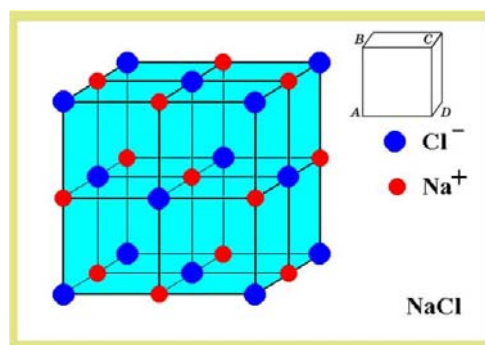
1. Кристаллические тела, в отличие от аморфных, имеют определённую температуру плавления, после которой кристаллическая решётка разрушается, поэтому верным является утверждение 2.

---

- A12.** Имеется кубик кристалла соли и кубик такого же размера из аморфного стекла. Из кубика соли вырезают столбики одинакового размера вдоль ребра  $AB$  и вдоль диагонали  $AC$  и проводят испытания на разрыв. Получают отношение нагрузок, при которых происходит разрушение столбиков:  $\frac{F_{AB}}{F_{AC}}$ . Затем проводят такие же измерения для столбиков, вырезанных вдоль этих же направлений из стеклянного кубика. Полученное отношение нагрузок
- 1) равно 1 для соли и для стекла
  - 2) не равно 1 для соли и для стекла
  - 3) равно 1 для соли и не равно 1 для стекла
  - 4) не равно 1 для соли и равно 1 для стекла

### Решение

1. Стекло аморфное вещество, обладающее изотропией прочностных свойств.
2. Соли, имеющие кристаллическую структуру строения, обладают анизотропией, их свойства, включая прочностные, зависят от направления.
3. Верным является утверждение 4.



**A14.** В таблице приведена зависимость температуры плавления ряда веществ от их молярной массы.

Вещество	М, кг/моль	$t_{пл}$ , °С	Вещество	М, кг/моль	$t_{пл}$ , °С
Литий	7	180	Кремний	28	1410
Бериллий	9	900	Сера	32	113
Бор	11	2300	Хлор	35,5	-101
Фтор	19	-220	Калий	39,1	64
Неон	20	-248	Кальций	40	839
Натрий	23	98	Скандий	44	1541
Алюминий	27	660	Титан	48	1660

На основании этих данных можно заключить, что для данной группы веществ температура плавления с ростом молярной массы вещества

- 1) монотонно увеличивается
- 2) монотонно уменьшается
- 3) периодически растёт, а затем спадает
- 4) изменяется случайным образом с ростом молярной массы

#### Решение

1. В таблице неверно указана размерность молярной массы, очевидно её следует исчислять г/моль. Более или менее корректным утверждением является 3 утверждение, хотя явного спада с ростом молярной массы не наблюдается, хотя бы для кальция, скандия и титана.

---

### Плавление и кристаллизация

**A15.** В процессе плавления кристаллического тела происходит

- 1) уменьшение размеров частиц
- 2) изменение химического состава
- 3) разрушение кристаллической решетки
- 4) уменьшение кинетической энергии частиц

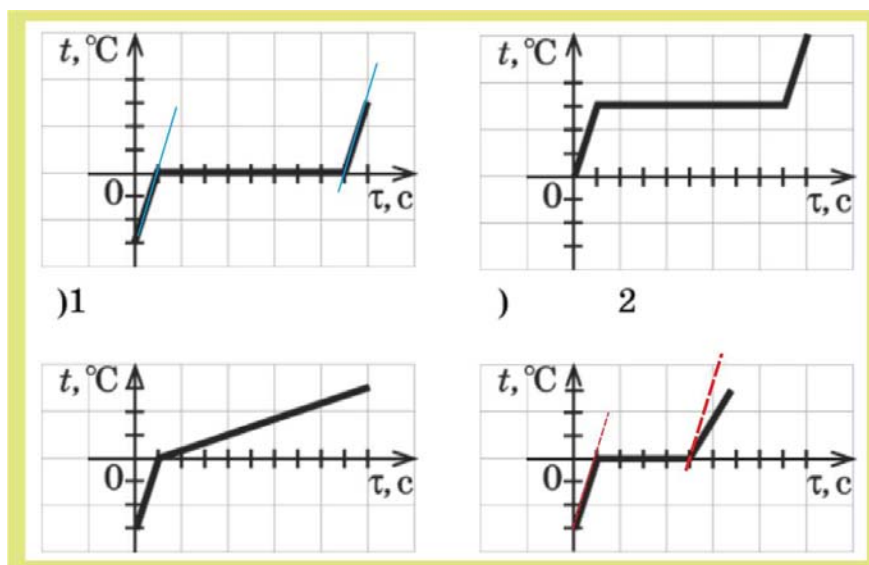
#### Решение

1. Плавление представляет собой в упрощённом виде процесс разрушения связей между элементами кристаллической структуры. Энергия тепловых колебаний ионов при температуре плавления становится равной или превосходит энергию связей между ними и ионы, присоединяя свободные электроны превращаются в нейтральные атомы, существуя вне кристалла.

---

**A16.** На каком из графиков правильно изображена зависимость температуры от времени в сосуде, который наполнен льдом и поставлен на горелку. Удельная теплоемкость воды больше удельной теплоемкости льда. Мощность горелки считать постоянной.

**Решение**



1. Правильно изображена зависимость температуры от времени на графике 4. График 1 справедлив для вещества, у которого удельные теплоёмкости в жидкой и твёрдой фазе одинаковы. На самом деле  $c_B \approx 4200$  Дж/кг·К, а у льда  $c_L \approx 2100$  Дж/кг·К, а процесс нагревания подчиняется уравнению:

$$Q = P\tau = cm\Delta T;$$

**A17.**  $\rho_1$  — плотность вещества в жидком состоянии,  $\rho_2$  — после кристаллизации. Какое соотношение плотностей справедливо?

- 1)  $\frac{\rho_1}{\rho_2} > 1$
- 2)  $\frac{\rho_1}{\rho_2} < 1$
- 3)  $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1$
- 4)  $\frac{\rho_1}{\rho_2}$  зависит от вещества

**Решение**

1. Соотношение плотностей зависит от физических и химических свойств вещества. Как правило в твёрдом состоянии плотность выше, однако есть аномалии. Лёд всё таки плавает в воде, хоть и не очень хорошо, примером могут служить айсберги.

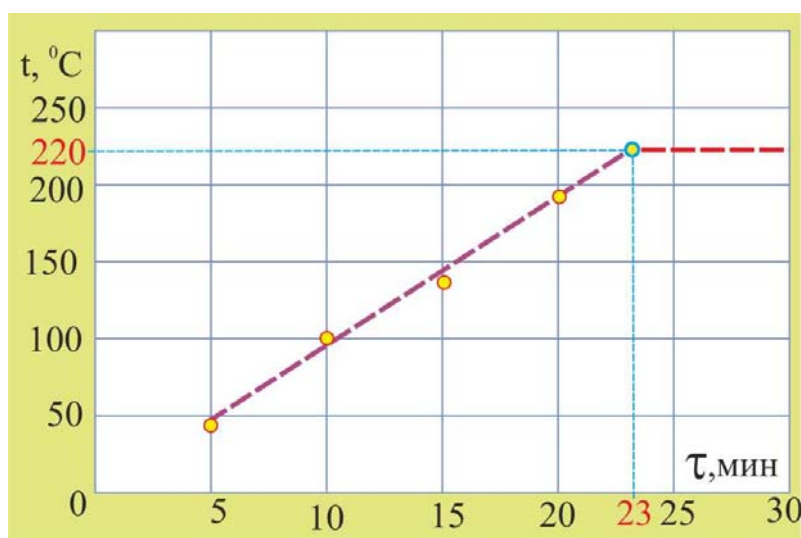
**A18.** В таблице указаны результаты измерения температуры твердого кристаллического вещества с температурой плавления  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$  спустя время  $t$  после начала равномерного нагревания его на электроплитке. Ошибка в измерении температуры  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$t$ , мин	5	10	15	20
$t$ , $^{\circ}\text{C}$	48	100	145	190

Можно утверждать, что в сосуде после начала нагревания при неизменных условиях находятся

- 1) через 15 минут — твердое тело, через 30 минут — твердое тело
- 2) через 15 минут — жидкость, через 30 минут — жидкость
- 3) через 15 минут — жидкость, через 30 минут — твердое тело
- 4) через 15 минут — твердое тело, через 30 минут — жидкость и твердое тело

### Решение



1. Судя по заданной зависимости (графику изменения температуры вещества от времени) температура плавления будет достигнута примерно через 23 минуты нагревания, затем температура станет постоянной. Теплота, подводимая к кристаллическому веществу, будет расходоваться на плавление.

2. Поскольку процесс плавления занимает определённое время, то через 30 минут вещество будет частично расплавлено, а частично будет находиться в твёрдом кристаллическом состоянии.

3. Через 15 минут кристаллическое вещество будет находиться в состоянии твёрдого тела, а через 30 минут в смешанном состоянии, как в твёрдом, так и в жидком.

## Преобразования энергии при изменениях агрегатного состояния вещества

**A19.** Как изменяется внутренняя энергия вещества при кристаллизации?

- 1) увеличивается
- 2) не изменяется
- 3) уменьшается
- 4) может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от кристаллической структуры тела

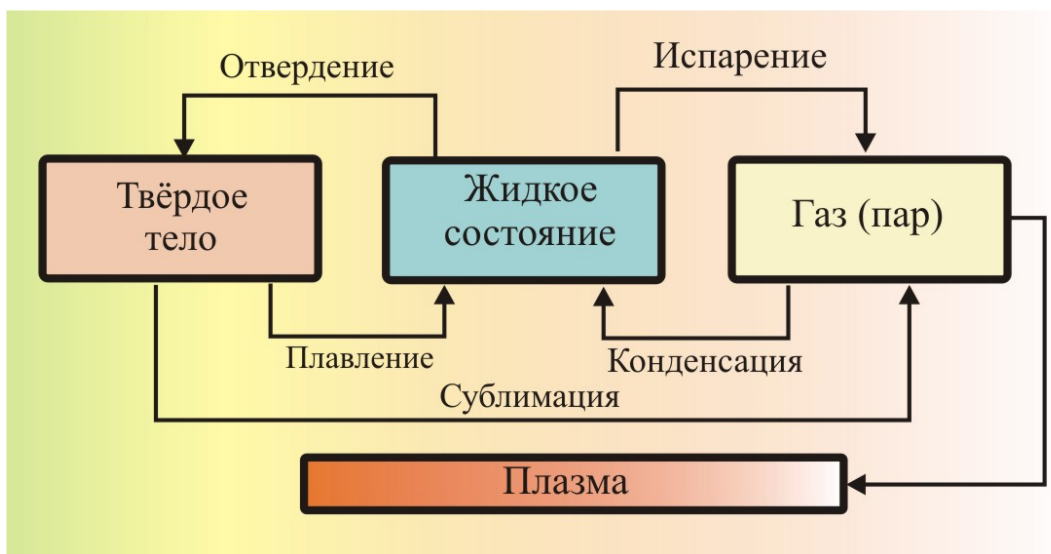
### Решение

1. Многие из известных веществ, в зависимости от внешних условий, могут находиться в четырёх агрегатных состояниях твёрдом, жидком, газообразном и плазменном. В физике принято особенности строения и состояния веществ характеризовать отношением средней величины кинетической энергии поступательного движения молекул к величине их потенциальной энергии. Для газов такое отношение на много меньше единицы, для твёрдых тел – на много больше единицы, а для жидкостей соотношение между энергиями близко к единице

$$\langle \varepsilon_{\text{Пост.}} \rangle \gg U(r_0) - \text{для газа,}$$

$$\langle \varepsilon_{\text{Пост.}} \rangle \ll U(r_0) - \text{для твёрдого тела,}$$

$$\langle \varepsilon_{\text{Пост.}} \rangle \approx U(r_0) - \text{для жидкости.}$$



Фазовые состояния вещества

2. Частицы, составляющее вещество: ионы, молекулы или атомы в большей или меньшей степени находятся в постоянном взаимодействии друг с другом, которое, собственно и определяет состояние. При относительно низких температурах частицы расположены в виде правильных геометрических фигур. Вещество находится в твёрдом состоянии, частицы совершают тепловые колебания, которые не нарушают взаимного расположения структурных элементов. Если температуру повышать, то

амплитуда колебаний начинает возрастать, т.е. увеличивается кинетическая энергия частиц. При некоторых значениях температуры энергия колебаний становится равной или превосходит энергию взаимодействия, связи при этом постоянно разрываются и снова восстанавливаются. К колебательным степеням свободы добавляются вращательные и даже поступательные. Строгая геометрическая конфигурация относительного расположения частиц нарушается. Вещество из твёрдого состояния переходит в жидкое состояние. В этом случае говорят о фазовом переходе первого рода.

3. Дальнейшее повышение температуры сопровождается ещё большими амплитудами колебаний частиц, в конце концов, частицы удаляются друг от друга, превращаясь в реальный газ, а затем перестают взаимодействовать. Вещество становится газообразным. Структурные элементы движутся исключительно поступательно «не замечая друг друга». Взаимодействие происходит только при столкновениях. При дальнейшем увеличении температуры до нескольких сот тысяч градусов энергия, которой обмениваются частицы при столкновениях, становится настолько большой, что атомы начинают терять электроны. Ядра и электроны существуют независимо друг от друга. Это состояние вещества принято называть плазмой.

4. Жидкости занимают промежуточное положение между твердым и газообразным состоянием. Жидкостям присущи как свойства твердых тел, так и веществ, находящихся в газовом состоянии. Как твёрдые тела, жидкости характеризуются определённым объёмом, способны образовывать поверхности раздела, обладают некоторой прочностью на разрыв, но вместе с тем, одновременно располагают свойствами типичными для газов. Жидкости не способны сохранять, подобно твёрдым телам, свою форму, принимая форму сосуда. Отличительными от других состояний является текучесть и упругость жидкостей.

5. Структурные элементы материи (молекулы и атомы) могут участвовать одновременно в нескольких типах теплового движения, поступательном, вращательном и колебательном. Набор движений, которые совершает молекула или атом определяется числом степеней свободы. У газообразных веществ в условиях близких к нормальным молекулы или атомы характеризуются тремя поступательными степенями свободы. Структурные элементы веществ, находящихся в твёрдом состоянии вследствие значительных сил межмолекулярного взаимодействия совершают только колебательные движения вокруг положения равновесия.

6. Полная упорядоченность структуры твёрдого состояния материи и абсолютный беспорядок её газообразного состояния являются крайними, посередине располагается вещество «в несколько упорядоченном беспорядке».

7. Внутреннюю энергию состояния можно на качественном уровне оценить уравнением:

$$U = \frac{i}{3} \nu RT,$$

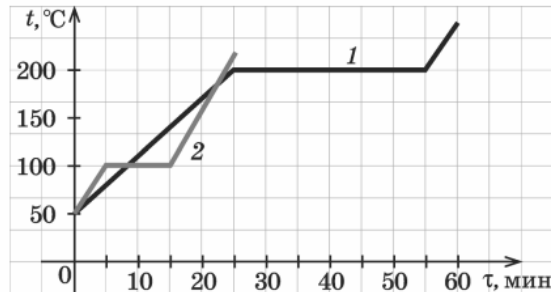
где  $i$  – число степеней свободы структурных элементов вещества. У веществ в твёрдом состоянии степени свободы только колебательные, а в жидком состоянии к ним прибавляются и степени свободы, связанные с поступательными перемещениями, поэтому:

$$i_{\text{жид}} > i_{\text{тв}},$$

поэтому при кристаллизации внутренняя энергия вещества уменьшается.

---

**A20.** На графике показаны кривые нагревания двух жидкостей одинаковой массы при постоянной мощности подводимого тепла. Отношение удельной теплоты парообразования первого вещества к удельной теплоте парообразования второго равно



- 1)  $\frac{1}{3}$                       2)  $\frac{1}{2}$                       3) 2                      4) 3

**Решение**

1. Для первого вещества процесс испарения, переход из жидкого состояния в паробразное состояние длится  $\tau_1 \approx 30$  минут, а для второго тела –  $\tau_2 \approx 10$  мин:

$$\left. \begin{aligned} P\tau_1 &= m r_1; \\ P\tau_2 &= m r_2; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{r_1}{r_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{30}{10} = 3;$$

**A21.** При отводе от вещества в кристаллическом состоянии количества теплоты  $Q$  при постоянной температуре  $T$  происходит переход вещества массой  $m$  из твердого состояния в жидкое. Какое выражение определяет удельную теплоту плавления этого вещества?

- 1)  $\frac{Q}{m}$                       2)  $\frac{Q}{mT}$                       3) 2                      4) 3

**Решение**

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

**C2.** В электрический кофейник налили воду объемом 1 л при температуре  $20^\circ\text{C}$  и включили нагреватель. Через какое время (в секундах) после включения выкипит вся вода, если мощность нагревателя равна 1 кВт, КПД нагревателя равен 0,8? Удельная теплота парообразования воды при  $t = 100^\circ\text{C}$  равна  $r = 2,26$  МДж/кг. Удельная теплоемкость воды равна  $4200$  Дж/(кг · К).

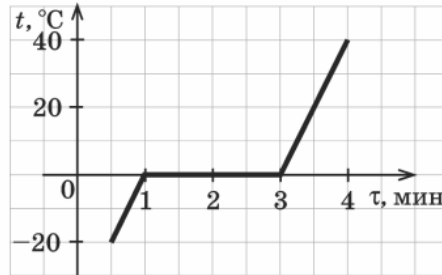
**Решение**

1. Уравнение теплового баланса:

$$\eta P \tau = c \rho V (t_k - t_0) + r \rho V; \quad \rho V = m = 1 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \approx 1 \text{ кг}$$

$$\tau = \frac{cm\Delta t + rm}{\eta P} = \frac{m(c\Delta t + r)}{\eta P} = \frac{1(4200 \cdot 80 + 2,26 \cdot 10^6)}{800} \approx 3,25 \cdot 10^3 \text{ с};$$

С3. На рисунке представлен график изменения температуры вещества в калориметре с течением времени. Теплоемкостью калориметра и тепловыми потерями можно пренебречь и считать, что подводимая к сосуду мощность постоянна. Рассчитайте удельную теплоемкость вещества в жидком состоянии. Удельная теплота плавления вещества равна  $\lambda = 100$  кДж/кг. В начальный момент времени вещество находилось в твердом состоянии.



### Решение

1. Время плавления:

$$\tau_1 = 3 - 1 = 2 \text{ мин};$$

2. Количество теплоты, полученной веществом за это время:

$$Q_1 = P\tau_1 = m\lambda;$$

3. Количество теплоты, полученной при нагревании жидкости:

$$P\tau_2 = cm\Delta T; \quad \Delta t = \Delta T = 40\text{К};$$

4. Поскольку количество теплоты поступающей в единицу времени одинаково, то:

$$m\lambda \frac{\tau_1}{\tau_2} = cm\Delta T; \quad \Rightarrow \quad c = \frac{\tau_1}{\tau_2} \frac{\lambda}{\Delta T} = \frac{120}{60} \frac{10^5}{80} = 1250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$



## 3. Электродинамика

### 3.1. Закон Кулона. Напряжённость электрического поля

#### Электризация. Электрический заряд. Взаимодействие зарядов

- A1.** При трении пластмассовой линейки о шерсть шерсть заряжается положительно. 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

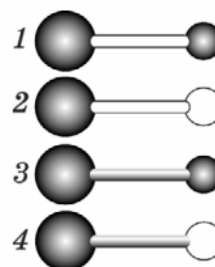
#### Решение

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

2. **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.

- **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. **В рассматриваемом случае свободные электроны переходят с шерсти на линейку.**
-

**A2.** На рисунке показаны четыре способа соединения большого металлического положительно заряженного шара с малым шаром. В каком случае заряд большого шара изменится сильнее? При этом используются металлические (черные) и пластмассовые (белые) шары и стержни.



- 1) в первом
- 2) во втором
- 3) в третьем
- 4) в четвертом

### Решение

- **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 перейдет часть электронов с незаряженного тела;
- **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 разноименно заряженных тела.
- Заряд большого шара за фиксированный промежуток времени изменится более всего в третьем случае, когда произойдет электризация посредством электропроводности.

### Два вида электрического заряда. Элементарный электрический заряд

**A3.** Заряд электрона был установлен в опытах

- 1) Дж. Дж. Томсона
- 2) Р. Милликена
- 3) Э. Резерфорда
- 4) М. Фарадея

### Решение

1. **Электрическим зарядом**, по современным представлениям, является физическая скалярная величина, определяющая интенсивность электромагнитных взаимодействий, возникающих как между электрически заряженными частицами (точками), так и между заряженными макроскопическими телами.

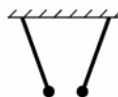
**Свойства электрического заряда:**

- **Носителями электрического заряда** являются элементарные частицы – протон и электрон, а так же нестабильные частицы:  $\pi$  – мезоны,  $\mu$  – мезоны и т.д.;
- В природе существуют частицы с **положительными и отрицательными зарядами**. Заряд электрона, самый маленький из всех известных (элементарный) к настоящему времени, считается отрицательным (факт сугубо исторический) и равным  $e \cong -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. В качестве положительного элементарного заряда принят заряд протона  $p = +e = +1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;
- **Электрон** является наименьшей из известных по массе стабильной частицей, обладающей элементарным зарядом. Элементарный заряд был открыт Дж. Дж. Томсоном в 1897 г. и **впервые измерен непосредственно в 1909 г. Робертом Милликеном (США)**;
- **Основная загадка** электрического заряда, не вполне разрешённая к настоящему времени, заключается в том, что электрон и протон, имея одинаковые по модулю заряды, отличаются по массе примерно в 1670 раз: масса электрона –  $m_e \cong 1 \cdot 10^{-30}$  кг, масса протона  $m_p \cong 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг;
- Заряд **макроскопического тела** определяется разностью между количеством электронов  $N_e$  и протонов  $N_p$ 
  - $Q = e(N_p - N_e)$ ;
- В природе экспериментально дробные заряды в свободном состоянии не обнаружены, т.е. **электрический заряд является квантованной величиной**.

**А4.** На тонких шелковых нитях подвешены два заряженных одинаковых шарика (рис.). Какое из утверждений верно?

- 1) Заряды шариков обязательно равны по модулю.
- 2) Силы, действующие на каждый из шариков, различны.
- 3) Заряды шариков имеют одинаковый знак.
- 4) Заряды шариков имеют разные знаки.

Ответ:



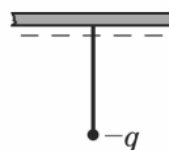
**Решение**

1. Как показано на рисунке, шарики притягиваются друг к другу, поэтому можно утверждать, что они имеют разноимённые заряды, т.е. взаимодействуют заряды разного знака.

**А5.** К бесконечной горизонтальной отрицательно заряженной плоскости привязана невесомая нить с шариком, имеющим отрицательный заряд (рис.). Укажите условие равновесия шарика, если  $mg$  — модуль силы тяжести,  $F_s$  — модуль силы кулоновского взаимодействия шарика с пластиной,  $T$  — модуль силы натяжения нити.

- 1)  $-mg - T + F_s = 0$
- 2)  $mg - T + F_s = 0$
- 3)  $mg + T + F_s = 0$
- 4)  $mg - T - F_s = 0$

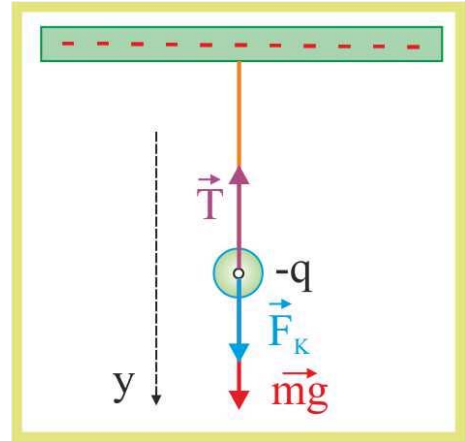
Ответ:



### Решение

1. Сила электрического взаимодействия шарика с заряженной плоскостью будет силой отталкивания, поэтому условие равновесия шарика, подвешенного на диэлектрической нити, в проекции на вертикальную ось представится следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{i=3} \vec{F}_{i(y)} = mg + F_K - T = 0;$$



**A6.** Незаряженная цинковая пластина при освещении потеряла четыре электрона. Каким стал заряд пластины?

- 1) + 4 Кл
- 2) - 4 Кл
- 3) +  $6,4 \cdot 10^{-19}$  Кл
- 4) -  $6,4 \cdot 10^{-19}$  Кл

### Решение

$$|q| = 4e = 1,6 \cdot 10^{-19} = 6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \Rightarrow q = +6,4 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

**B1.** Незаряженную алюминиевую спицу заряжают отрицательным зарядом, касаясь пластмассовой линейкой, потертой о шерсть. Что при этом происходит с числом электронов, протонов и атомов алюминия на спице?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

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

### Решение

1. Поскольку спица приобретает отрицательный заряд, то на ней имеется избыток электронов, а число протонов сохраняется, протоны входят в состав ядра и менее подвижны:

Число электронов	Число протонов
1	3

### Закон сохранения электрического заряда

**A7.** От капли, имевшей электрический заряд + 2e, отделилась капля с зарядом +e. Модуль заряда оставшейся части капли

- 1) увеличился
- 2) уменьшился
- 3) не изменился
- 4) мог увеличиться и уменьшиться в зависимости от размера отделившейся капли

## Решение

1. Физиками обнаружено, что некоторые системы при определённых обстоятельствах обладают неизменными свойствами. Такие системы называются **консервативными**, в них выполняются законы сохранения. Всякий закон сохранения, по сути, сводится, к утверждению, что в отсутствии источников и стоков в системе её параметры неизменны во времени.

2. Электрический заряд тоже относится к категории консервативных характеристик замкнутых систем, не испытывающих влияния извне. Дело в том, что для замкнутых систем алгебраическая сумма их электрических зарядов остаётся неизменной.

Так, например, если взять некоторое фиксированное количество воды, обычной  $H_2O$ , и определить суммарный электрический заряд всех структурных элементов, то он не будет изменяться при механических, физических, химических процессах.

2. Закон сохранения заряда является одним из фундаментальных законов природы. Невыполнение этого закона не зафиксировано в известных процессах, происходящих в природе или воспроизводимых человеком. Закон сохранения заряда является собой принцип несотворимости и неуничтожимости движущейся материи. Формулировка закона проста и лаконична: **Алгебраическая сумма электрических зарядов любой электрически изолированной системы остаётся неизменной, при протекании любых процессов внутри этой системы**

$$Q = \sum_{i=1}^{i=n} q_i = \text{const} ,$$

где  $Q$  – полный электрический заряд системы тел или частиц,  $q_i$  – электрический заряд  $i$  – той части системы,  $n$  – число частей системы.

3. Этот закон, наряду с законами сохранения импульса и энергии, составляет теоретическую основу анализа широкого круга разнообразных процессов, как на макро уровне, так и на микро уровнях. В частности, закон сохранения заряда успешно использовался при анализе результатов атомных и ядерных реакций.

4. В твёрдых телах, где связи между упорядоченно расположенными в пространстве ионами сильны, имеется некоторое число свободных электронов, способных перемещаться в пределах тела, или даже покидать его.

5. Электрический заряд не может удерживаться телом бесконечно долго, он «стекает» на, присутствующие в воздухе капельки воды, которые обладают свойством поляризоваться за счёт энергии заряженных тел.

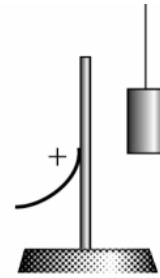
6. С точки зрения наличия свободных носителей заряда, электронов и ионов, все вещества условно поделены на три категории, которые количественно характеризуются удельным сопротивлением  $\rho$ , Ом·м: **Проводники**  $\rho \cong 10^{-8} - 10^{-6}$ ; **Полупроводники**  $\rho \cong 10^{-6} - 10^{-3}$ ; **Диэлектрики**  $\rho \cong 10^{-3} - 10^{16}$ .

7. Следует отметить, что некоторые вещества относятся сразу к двум типам веществ, в зависимости от внешних условий. Во-первых, все полупроводники имеют свойство быть и проводниками и диэлектриками. Например, кремний, германий, селен и др. в обычных условиях обладают электронной проводимостью, но весьма чувствительны к нагреванию, облучению, бомбардировке заряженными частицами.

$$|q| = 2e - e = e, \Rightarrow \text{заряд уменьшается.}$$

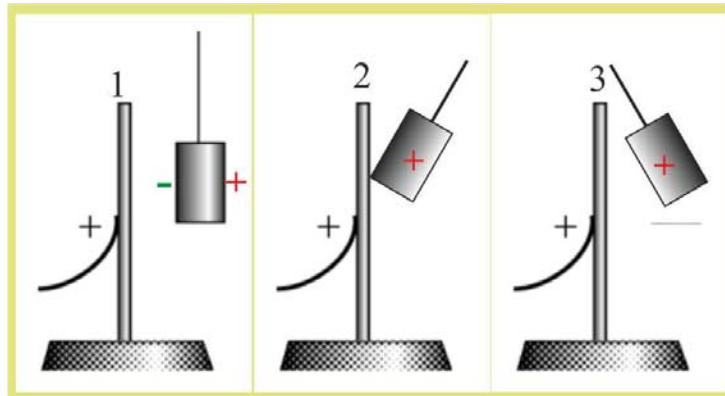
---

**A8.** Около небольшой металлической пластины, укрепленной на изолирующей подставке, подвесили на шелковой нити легкую металлическую незаряженную гильзу. Когда пластину подсоединили к клемме высоковольтного выпрямителя, подав на нее положительный заряд, гильза пришла в движение. Как будет двигаться гильза?



- 1) отклонится от пластины и остановится
- 2) приблизится к пластине и остановится
- 3) приблизится к пластине, прижмется к ней и остановится
- 4) приблизится к пластине, коснется ее, отклонится от пластины и остановится

### Решение



1. Вследствие электризации индукцией вначале произойдет пространственное разделение зарядов.
2. Поверхность гильзы ближняя к пластине приобретет отрицательный заряд и притянется к пластине.
- 3 При касании пластины гильза станет заряженной положительно и под действием силы Кулона отклонится вправо и остановится.

**A9.** На двух одинаковых металлических шарах находятся положительный заряд  $+Q$  и отрицательный заряд  $-5Q$ . При соприкосновении шаров заряд на каждом шаре станет равен

- 1)  $-4Q$
- 2)  $+6Q$
- 3)  $-2Q$
- 4)  $+3Q$

### Решение

1. С учётом одинаковости размеров шаров и в соответствии с законом сохранения энергии:

$$Q_1 = Q_2 = \frac{-5Q + Q}{2} = -2Q;$$

**A10.** Альфа-частица, являющаяся ядром атома гелия  $\text{He}^{2+}$ , попадает в пылинку, несущую избыточный электрон, и застревает в ней. Заряд пылинки после этого

- 1) 3 Кл
- 2) 1 Кл
- 3)  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл
- 4)  $3,2 \cdot 10^{-19}$  Кл

### Решение

1.  $\alpha$ -частица является дважды ионизированным атомом гелия, т.е. частица несёт положительный заряд  $+2e$ , а пылинка имеет заряд  $-e$ , таким образом, заряд пылинки станет равным  $e$

$$q = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл};$$

### Закон Кулона

**A11.** Сила кулоновского взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов

- 1) прямо пропорциональна расстоянию между ними
- 2) обратно пропорциональна расстоянию между ними
- 3) прямо пропорциональна квадрату расстояния между ними
- 4) обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними

### Решение

1. Система неподвижных электрических зарядов взаимодействует между собой посредством **электрического поля**. Взаимодействие осуществляется не мгновенно, а со скоростью распространения света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

2. **Основной закон электростатического взаимодействия** неподвижных точечных (размеры заряженных тел на много меньше расстояния между ними) был сформулирован в 1785 г. французским физиком Шарлем Огюстом Кулоном (1736 – 1806).

3. **Закон Кулона:** сила электрического взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами в вакууме пропорциональна произведению модулей их зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. В векторной форме закон Кулона записывается так

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \vec{r},$$

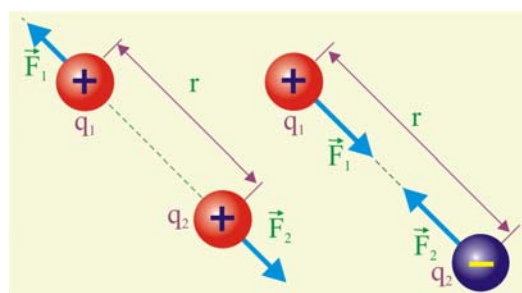


Рис. 1.1. Взаимодействие точечных зарядов

где  $\epsilon_0 \cong 9 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/(Н·м<sup>2</sup>) – электрическая постоянная, служащая для совмещения в СИ электрических величин  $[q]$  с механическими величинами  $[F, r]$ ,  $r$  – расстояние между зарядами.

4. **Силы взаимодействия** направлены всегда вдоль прямой, соединяющей заряды. Такие силы называют центральными. Одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые притягиваются.

5. **При решении задач** закон Кулона удобнее представлять в скалярной форме

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

где  $k$  – постоянный коэффициент, равный

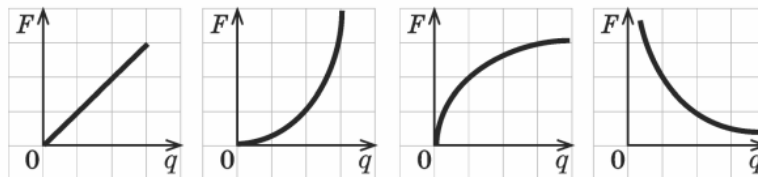
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2.$$

6. **Кулон** – единица электрического заряда определяемая как количество электричества, проходящее через поперечное сечение проводника при силе тока в 1 А за время  $\tau = 1$  с. **Кулон** является весьма большой величиной. Так, например, два заряда  $q_1 = q_2 = 1$  Кл, помещённые на расстояние  $r = 1$  м, взаимодействуют в соответствии с (1.3) с силой  $F \cong 9 \cdot 10^9$  Н ( вес 900 тыс. тонн груза). На практике используют чаще всего микрокулоны (  $1 \text{ мкКл} = 10^{-6}$  Кл ) и нано кулоны (  $1 \text{ нКл} = 10^{-9}$  Кл )

7. **Влияние среды** на взаимодействие электрических зарядов определяется безразмерной величиной  $\epsilon$  – диэлектрической проницаемостью среды. Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз сила кулоновского взаимодействия в данной среде  $F$ , меньше чем в вакууме или воздухе  $F_0$

$$F = \frac{k}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \Rightarrow \epsilon = \frac{F_0}{F},$$

**A12.** Какой из графиков соответствует зависимости модуля силы взаимодействия  $F$  двух неподвижных точечных зарядов от модуля одного из зарядов  $q$  при неизменном расстоянии между ними? Модуль второго заряда в каждый момент времени равен модулю первого заряда.



1)

2)

3)

4)

**Решение**

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}; \quad |q_1| = |q_2|; \quad F = \frac{q^2}{r^2}; \quad F \sim q^2 - \text{график 2.}$$

**A13.** Как изменится сила кулоновского взаимодействия двух точечных электрических зарядов, если расстояние между ними уменьшить в  $k$  раз?

- 1) увеличится в  $k$  раз
- 2) уменьшится в  $k$  раз
- 3) уменьшится в  $k^2$  раз
- 4) увеличится в  $k^2$  раз

**Решение**

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



**A14.** С какой силой взаимодействуют два маленьких заряженных шарика, находящиеся в вакууме на расстоянии 9 см друг от друга? Заряд каждого шарика равен  $3 \cdot 10^{-6}$  Кл.

- 1) 0,09 Н
- 2) 1 Н
- 3) 10 Н
- 4)  $3,3 \cdot 10^6$  Н

**Решение**

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \approx 9 \cdot 10^9 \frac{9 \cdot 10^{-12}}{81 \cdot 10^{-4}} \approx 10 \text{ Н};$$

**Электрическое поле. Действие  
электрического поля на электрические заряды.  
Напряженность электрического поля**

**A15.** Силовая линия электрического поля — это

- 1) линия, вдоль которой в поле будет двигаться положительный заряд
- 2) линия, вдоль которой в поле будет двигаться отрицательный заряд
- 3) светящаяся линия в воздухе, которая видна при большой напряженности поля
- 4) линия, в каждой точке которой напряженность поля направлена по касательной

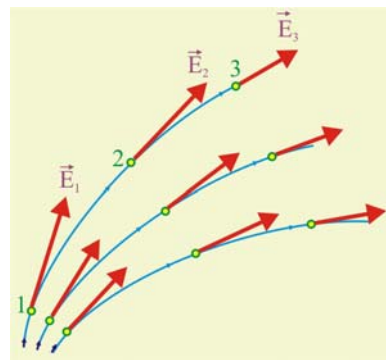
**Решение**

1. Как и в случае гравитации, электрические поля не следует рассматривать как разновидность вещества. **Поля — это особая форма материи**, обладающая целым набором свойств, присущих веществу, например, импульсом и энергией.

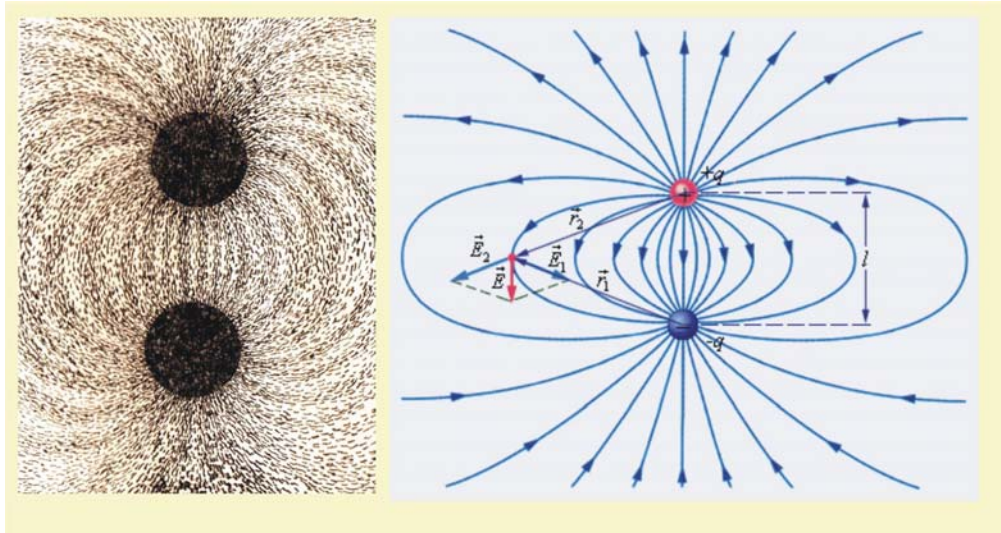
2. **За направление вектора  $\vec{E}$**  принимается направление силы, с которой поле действует на пробный заряд, помещенный в данную точку поля.

3. **Графически** электрическое поле удобно изображать посредством силовых линий. **Силовыми линиями** или линиями напряженности электрического поля называются такие линии, касательные к которым в каждой их точке совпадают с вектором напряженности поля.

4. **Линии напряженности электрического поля** никогда не пересекаются, они начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах. В качестве примера приведена структура поля диполя, представляющего собой два разноименных, одинаковых по модулю зарядов, отстоящих друг от друга на расстоянии  $\ell$ .

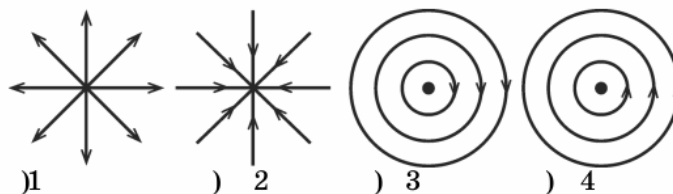


*Линии напряженности*



Электрическое поле диполя

**A16.** На каком рисунке правильно изображена картина линий напряженности электростатического поля точечного отрицательного заряда?

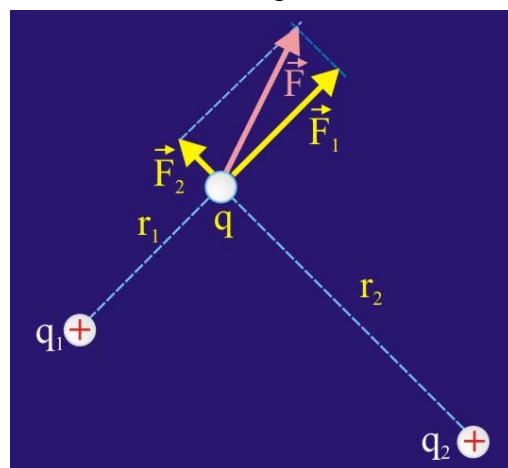


### Решение

1. **Электрическим полем** называется часть пространства, в котором проявляются электрические силы. Электрическое поле, в современных представлениях рассматривается как частная форма проявления (наряду с магнитным полем) электромагнитного поля, определяющая действие на электрический заряд силы, не зависящей от скорости его движения. Представление об электрическом поле было введено в науку М. Фарадеем в 19 в. Согласно Фарадею, каждый покоящийся заряд создаёт в окружающем пространстве электрическое поле. Поле одного заряда действует на другой заряд, и наоборот; так осуществляется взаимодействие зарядов (концепция близкодействия).

2. **Закон Кулона** позволяет установить ряд математических следствий, количественно характеризующих физические процессы, протекающие в электрических полях. В частности, можно вычислить особенности взаимодействия системы точечных зарядов  $\{q_1, q_2, q\}$ . Определим силу, действующую на заряд  $q$  со стороны  $q_1$  и  $q_2$ , считая необходимые расстояния известными

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_1}{r_1^2}; \quad F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_2}{r_2^2};$$



Геометрическая сумма сил Кулона

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2;$$

$$|\vec{F}| = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos(\vec{F}_1; \vec{F}_2)};$$

3. Геометрически сумма сил определяется по правилу параллелограмма. Необходимо обратить внимание, что силы  $F_1$  и  $F_2$  пропорциональны заряду  $q$ , следовательно, и результирующая сила  $F$  тоже будет пропорциональна этому заряду. Если изменить величину зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , то параллелограмм сил изменит свою величину, но останется подобным первоначальному параллелограмму.

4. Поделим уравнения сил Кулона на величину заряда  $q$ , которую примем за условную единицу, т.е. будем рассматривать  $q$  как пробный заряд

$$\frac{F_1}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1^2} = E_1;$$

$$\frac{F_2}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2^2} = E_2; \quad \left[ \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} \equiv \frac{\text{В}}{\text{м}} \right];$$

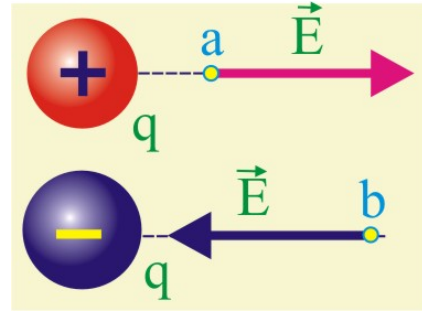
5. Векторная величина  $\vec{E}$  называется **напряжённостью электрического поля**. Для изолированного точечного заряда, расположенного в вакууме или сухом воздухе, напряжённость создаваемого им электрического поля определяется непосредственно из уравнения закона Кулона

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

6. 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. В случае отрицательного заряда вектор напряжённости так же направлен по радиус-вектору, но из данной точки в сторону заряда.

7. 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  $q$ .

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



Направление напряжённости электрического поля

**A17.** Как изменится модуль напряженности электрического поля, созданного точечным зарядом, при увеличении расстояния от этого заряда до точки наблюдения в  $k$  раз?

- 1) увеличится в  $k$  раз
- 2) уменьшится в  $k$  раз
- 3) увеличится в раз
- 4) уменьшится в раз

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2}; \\ E_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q|}{k^2 r^2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow E_2 = \frac{E_1}{k^2};$$

- В2.** Сила, действующая в поле на заряд в  $4 \cdot 10^{-5}$  Кл, равна 20 Н. Чему равна напряженность поля в этой точке?

**Решение**

$$\vec{F} = q\vec{E}; \Rightarrow |\vec{E}| = \frac{F}{q} = \frac{20}{4 \cdot 10^{-5}} = 5 \cdot 10^3 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

- С1.** Шарик массой  $m = 0,2$  г подвешен на шелковой нити длиной  $L = 15$  см. Шарик имеет положительный заряд  $q = +10^{-7}$  Кл и находится в однородном электрическом поле напряженностью  $E = 10^4$  В/м, направленной вертикально вниз. Каков период малых колебаний шарика?

**Решение**

1. Модуль силы Кулона, действующей на заряженный шарик в вертикальном электрическом поле:

$$F_K = qE;$$

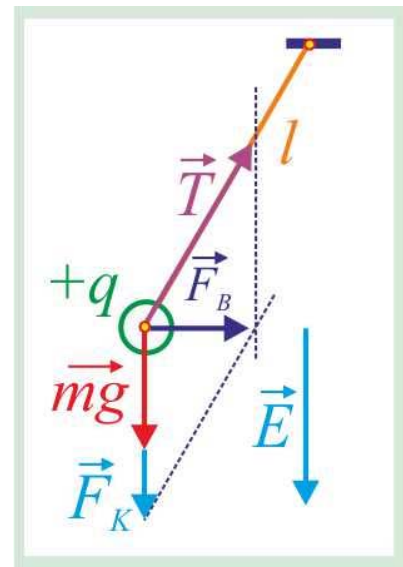
2. Ускорение шарика, обусловленное действием силы Кулона:

$$a = \frac{F_K}{m} = \frac{qE}{m};$$

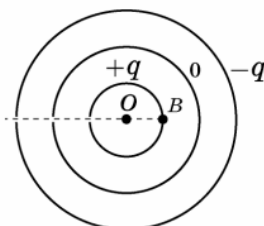
3. Период малых колебаний заряженного шарика в электрическом поле:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g+a}} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g + \frac{qE}{m}}};$$

$$T = 6,28 \sqrt{\frac{0,15}{10 + \frac{10^{-7} \cdot 10^4}{2 \cdot 10^{-4}}} \approx 0,628\text{с};$$



- С2.** Три концентрические равномерно заряженные сферы радиусом 10, 20, 30 см несут заряд  $+q$ , 0 и  $-q$  соответственно. В каждой из них имеется по одному малому отверстию, причем они расположены на одной прямой, проходящей через центр сфер  $O$ , перпендикулярно их поверхностям. Вдоль этой линии из точки  $A$ , расположенной на расстоянии 40 см от центра сферы, летит электрон, пролетает сквозь все отверстия и оседает на стенке в точке  $B$ . Какова суммарная длина отрезка, на которой меняется скорость электрона при полете от  $A$  до  $B$ . Ответ обоснуйте.



## Решение

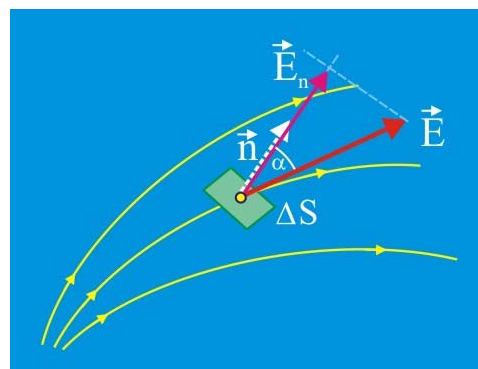
1. Теорема Остроградского-Гаусса была представлена русским математиком и механиком Михаилом Васильевичем Остроградским в виде некоторой общей математической теоремы, применительно к полю векторных величин, в частности, к векторному полю скоростей движущейся жидкости. Немецкий математик Карл Фридрих Гаусс применил её для электростатических полей. Теорема весьма упрощает процесс анализа электростатических полей ансамбля зарядов и заряженных тел.

2. Структуру векторного поля составляют векторные, или как их называют в физике, силовые линии – кривые в пространстве, касательная в каждой точке которых совпадает по направлению с определенным в этой точке пространства вектором поля.

3. Следует отметить, что в отличие от скалярных полей (например, поля температур) структура векторных полей гораздо более сложная. Это связано с характером поведения векторных линий в различных точках пространства. Так, могут существовать точки пространства, в которых векторные линии могут начинаться или заканчиваться. Если какая-либо точка пространства является началом векторных линий, то говорят, что в этой точке пространства находится **источник векторного поля**. Точка же пространства, в которой заканчиваются векторные линии, называется **стоком векторного поля**.

4. Очевидно, что для электрического поля источниками и стоками являются, соответственно, положительные и отрицательные заряды. При этом, чем больше векторных линий начинается в данной точке пространства, тем мощнее и интенсивнее находящийся в этой точке пространства источник поля.

5. Рассмотрим часть пространства, занятого электрическим полем, характеризуемым некоторым распределением силовых линий. Для исследования поля важной характеристикой является «густота» силовых линий. Чем гуще силовые линии в данном месте поля, тем более интенсивен источник поля. Для количественных оценок количества силовых линий проходящих через единичную площадку служит **поток вектора напряжённости**, определяемый математически как:



*Поток напряжённости*

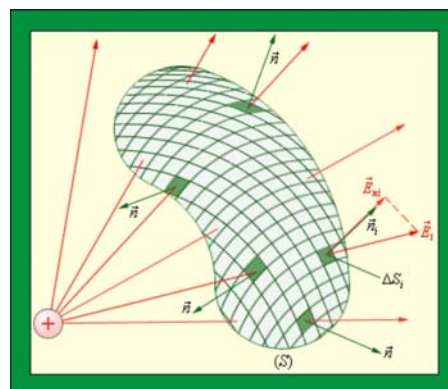
$$\Delta\Phi_E = \vec{E}_n \Delta S = E \cos \alpha \Delta S,$$

где  $E_n$  – проекция вектора напряжённости на внешнюю нормаль  $\vec{n}$ .

6. Для определения потока вектора напряжённости через поверхность сложной формы, её разбивают на множество элементарных площадок, с тем, чтобы каждую из них можно было считать плоской. В этом случае к каждой площадке можно провести нормаль и установить однозначное значение угла  $\alpha$ .

7. Поток через поверхность в этом случае определится в виде суммы элементарных потоков

$$\Phi_E = \sum_{i=1}^{i=n} E_{ni} \Delta S_i ;$$



*Поток напряжённости  
через криволинейную поверхность*



8. При достаточно большом количестве элементарных площадок, составляющих заданную криволинейную поверхность, поток определится в виде криволинейного интеграла

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E}_n dS;$$

9. Найдём поток напряжённости поля электрического заряда  $q$ , через замкнутую поверхность, в качестве которой для начала возьмём сферическую поверхность радиуса  $R$ . Заряд равноудалён от всех точек поверхности сферы, поэтому напряжённость поля по всей поверхности одинакова

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R^2}; \Rightarrow \Phi_E = \oint_S E \cos\alpha dS;$$

11. Вектор напряжённости во всех точках, принадлежащих сфере будет перпендикулярен её поверхности, т.е. будет совпадать с направлением внешней нормали, поэтому

$$\cos\alpha = \cos 0^\circ = 1;$$

12. Поток через сферическую поверхность в этом случае определится как:

$$\Phi_E = ES = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \cdot 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0};$$

13. Окружим далее заряд  $q$  оболочкой произвольной формы площадью  $S^*$ . В независимости от формы и размеров новой оболочки количество силовых линий пронизывающих её будет прежним, следовательно, величина потока останется неизменной.

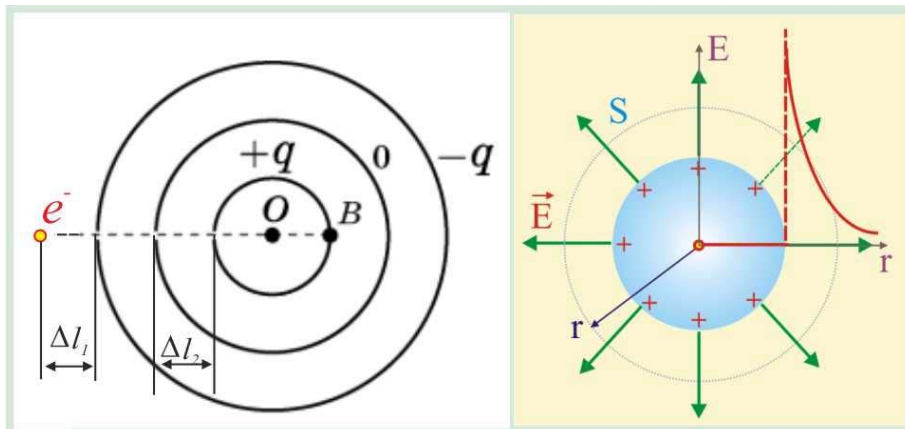
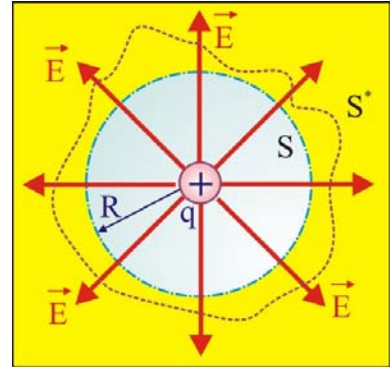
14. Если внутри замкнутой поверхности будет содержаться  $n$  электрических зарядов, то их потоки необходимо просуммировать алгебраически

$$\Phi_E = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{\epsilon\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{i=n} q_i;$$

Полученное уравнение является математической записью теоремы Остроградского – Гаусса, которая звучит так:

15. **Полный поток вектора напряжённости электростатического поля через замкнутую поверхность произвольной формы численно равен алгебраической сумме свободных электрических зарядов, заключённых внутри этой поверхности, поделенной на произведение электрической постоянной на диэлектрическую проницаемость среды  $\epsilon\epsilon_0$ .**

16. Применим теорему к задаче о движении электрона:



17. Напряжённость электрического поля внутри сферы будем полагать равной, в соответствии с теоремой Остроградского – Гаусса, нулю. В этом случае поле будет действовать на летящий электрон на перемещениях: тока А – поверхность отрицательно заряженной сферы радиусом 30 см, на расстоянии  $\Delta l_1 = 10$  см (ускоряющее поле) и в промежутке между первой и второй сферами  $\Delta l_2 = 10$  см (тормозящее поле). Таким образом, скорость электрона будет меняться на длине его пути:

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 = 20 \text{ см};$$

**С3.** Горизонтально расположенная, положительно заряженная пластина создает вертикально направленное однородное электрическое поле напряженностью  $E = 10^5$  В/м. На нее с высоты  $h = 10$  см падает шарик массой  $m = 40$  г, имеющий отрицательный заряд  $q = -10^{-6}$  Кл и начальную скорость  $v_0 = 2$  м/с, направленную вертикально вниз. Какую энергию шарик передаст пластине при абсолютно неупругом ударе?

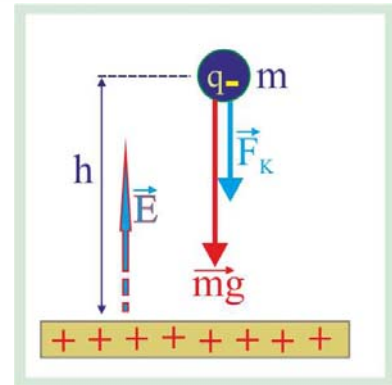
### Решение

1. Если поверхность пластины принять за нулевой уровень потенциальной энергии заряженного шарика, то суммарная его потенциальная энергия будет складываться из воздействия двух полей, гравитационного и электростатического

2. В соответствии с теоремой об изменении кинетической энергии:

$$\Delta K = \frac{mv_0^2}{2} + \sum_{i=1}^{i=2} A(\vec{F}_i) = \frac{mv_0^2}{2} + mgh + qEh;$$

$$\Delta K = \frac{mv_0^2}{2} + h(mg + qE) = \frac{4 \cdot 10^{-2} \cdot 4}{2} + 0,1(4 \cdot 10^{-2} \cdot 10 + 10^{-6} \cdot 10^5) = 0,13 \text{ Дж};$$

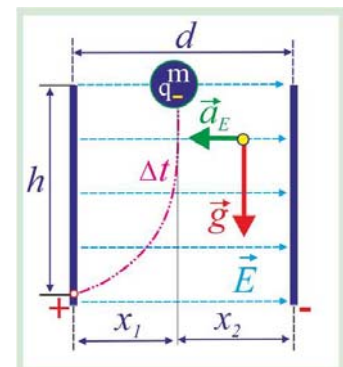


**С4.** Две непроводящие вертикально расположенные параллельные заряженные пластины находятся на расстоянии  $d = 10$  см друг от друга. Напряженность поля между ними  $E = 10^5$  В/м. Между пластинами на равном расстоянии от них помещен шарик, имеющий заряд  $q = 10^{-6}$  Кл и массу  $m = 40$  г. После того как шарик отпустили, он начал падать. Через какое время  $\Delta t$  шарик ударится об одну из пластин?

1. Плоское движение точечной массы, несущей на себе заряд в стационарном электрическом поле целесообразно разложить на две составляющие: вертикальное с ускорением свободного падения  $g$  и горизонтальное с ускорением, вызванным действием на заряд силы Кулона

$$a_E = \frac{qE}{m};$$

2. Время полёта заряда будет ограничено его падением



на отрицательно заряженную пластину

$$x_1 = \frac{a\Delta t^2}{2}; \Rightarrow \Delta t^2 = \frac{2x_1}{a} = \frac{2x_1 m}{qE}; \quad x_1 = \frac{d}{2}; \Rightarrow \Delta t = \sqrt{\frac{dm}{qE}};$$

$$\Delta t = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{0,1}} = 0,2c;$$

### Принцип суперпозиции электрических полей

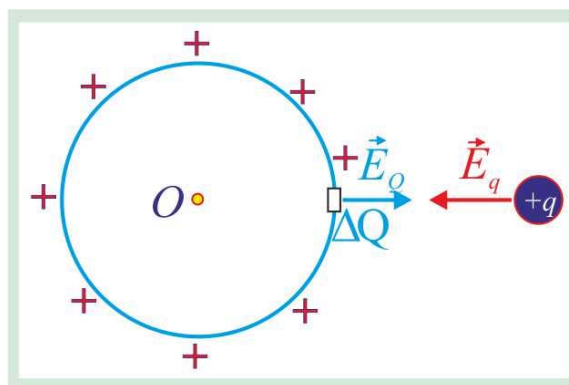
**A18.** К незаряженной сфере подносят точечный заряд  $q$ . Напряженность поля в центре сферы  $O$  равна

- 1) напряженности поля точечного заряда  $q$  в точке  $O$
- 2) напряженности поля наведенных зарядов на поверхности сферы
- 3) векторной сумме напряженностей полей точечного заряда  $q$  и наведенных на поверхности сферы зарядов
- 4) векторной разности напряженностей полей точечного заряда  $q$  и наведенных на ее поверхности зарядов

#### Решение

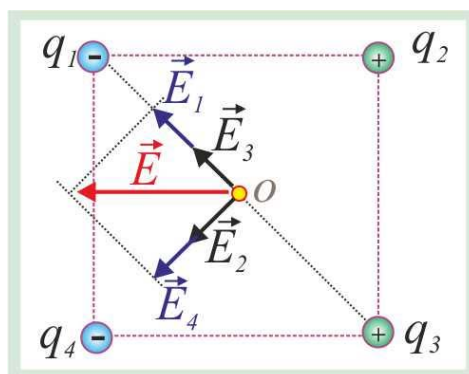
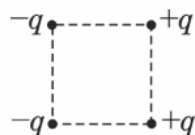
1. Через некоторое время сфера вследствие индукции приобретёт некоторый положительный электрический заряд, при этом векторы напряжённости этого наведённого поля будут направлены к центру сферы, а напряжённость положительного заряда будет направлена в противоположную сторону

$$\vec{E}_\Sigma = \vec{E}_q + \vec{E}_Q; \quad |\vec{E}_\Sigma| = E_q - E_Q;$$



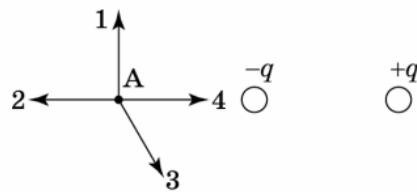
**A19.** Как направлен вектор напряженности поля в центре квадрата, в вершинах которого находятся заряды  $+q, +q, -q, -q$  (рис.)?

- 1)  $\rightarrow$
- 2)  $\leftarrow$
- 3)  $\uparrow$
- 4)  $\downarrow$



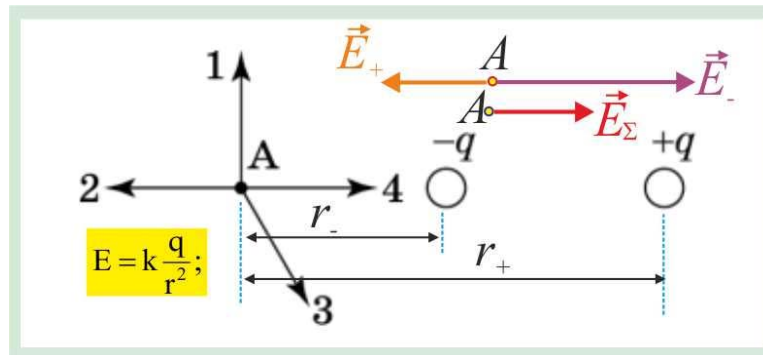


**A20.** На рисунке представлено расположение двух неподвижных точечных электрических зарядов  $-q$  и  $+q$ . Направлению вектора напряженности электрического поля этих зарядов в точке A соответствует стрелка



- 1) 1                      2) 2                      3) 3                      4) 4

**Решение**



**B3.** Два точечных заряда расположены в вершинах A и B правильного треугольника и создают в третьей его вершине C поле напряженностью  $100 \text{ В/м}$  каждый. Чему равна суммарная напряженность поля в вершине C?

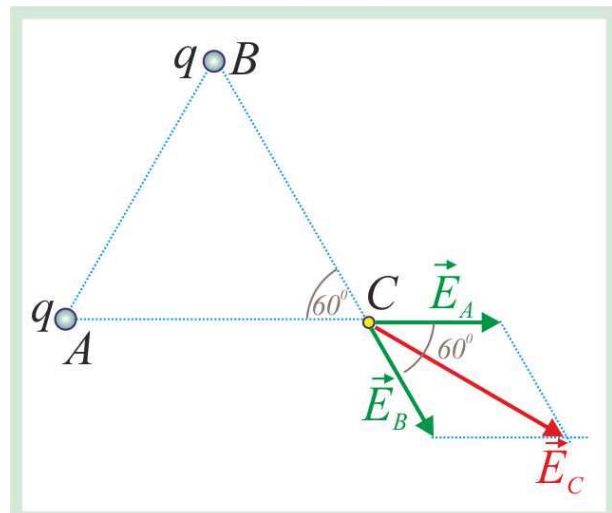
**Решение**

1. Используя правило векторного сложения по правилу параллелограмма, получим:

$$E_C = \sqrt{E_A^2 + E_B^2 + 2E_A E_B \cos(\vec{E}_A; \vec{E}_B)};$$

$$E_C = \sqrt{10^4 + 10^4 + 2 \cdot 10^4 \cdot 0,5};$$

$$E_C = 10^2 \sqrt{3} \cong 173 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$



## 3.2. Потенциал поля. Поле плоского конденсатора. Энергия плоского конденсатора

### Потенциальность электростатического поля

**A1.** В электростатическом поле работа сил, действующих на пробный заряд со стороны поля при его перемещении по замкнутому контуру

- 1) зависит от знака пробного заряда
- 2) зависит от формы контура
- 3) равна нулю только в однородном поле
- 4) всегда равна нулю

### Решение

1. В соответствии с законом сохранения, энергия не может беспричинно появляться и бесследно исчезать. Энергия может только трансформироваться из одного вида в другой. Ещё в V в. до с.л. Фалес милетский обратил внимание на то, что янтарная палочка, натёртая сухой кожей, способна притягивать всякую диэлектрическую мелочь. Т.е. просто палочка не может, а электризованная может совершать механическую работу.

2. При разряде лейденской банки или конденсатора между электродами проскакивает искра, которая сопровождается целым рядом явлений:

- Образование акустических волн в виде треска и щелков (молния генерирует даже громы);
- Возникновение электромагнитного излучения в световом диапазоне;
- Выделение тепла;
- Химические реакции, в частности, образование озона  $O_3$ ;

3. Так как электростатическое поле обладает энергией, значит оно способно совершать работу.

Рассмотрим перемещение в электростатическом поле отрицательного заряда  $q$  между разноимённо заряженными пластинами A и B, т.е. внутри плоского конденсатора.

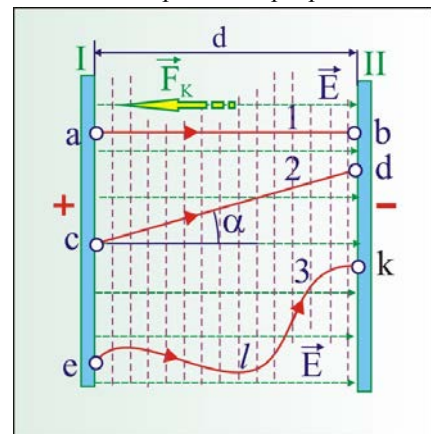
$$\delta A = \vec{F}_k d\vec{r};$$

$$A_{II \rightarrow I} = \int_{r_{II}}^{r_I} F_k \cos \alpha dr;$$

4. При перемещении заряда по траектории ba, заряд будет двигаться вдоль линии напряжённости поля, поэтому  $\cos \alpha = 1$



Электрический разряд



Вычисление работы

$$A_{b \rightarrow a} = F_k(r_I - r_{II}) = F_k d;$$

Если заряд перемещать между пластинами по траектории  $dc$ , то

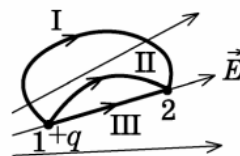
$$A_{d \rightarrow c} = F_k dc \cdot \cos \alpha = F_k d = qEd;$$

5. Перемещение по криволинейной траектории даст такой же результат. Представим криволинейную траекторию в виде множества отрезков, чтобы каждый из них считать прямой линией, при этом  $\cos \alpha$  для каждого отрезка будет различным, как положительным, так и отрицательным, что определит знаки элементарных работ  $\delta A$ . Алгебраическое суммирование элементарных работ приведет к ранее полученному результату. Полученные результаты удивительным образом напоминают ситуацию с работой силы тяжести, которая по замкнутой траектории всегда равна нулю. Аналогичным важным свойством обладает и электростатическое поле:

$$A = q \oint \vec{E} d\vec{\ell} = 0;$$

**A2.** В неоднородном электростатическом поле перемещается положительный заряд из точки 1 в точку 2 по разным траекториям (рис.). Сравните работы сил поля по этим траекториям.

- 1)  $A_1 > A_2 > A_3$
- 2)  $A_1 < A_2 < A_3$
- 3)  $A_1 > A_2 < A_3$
- 4)  $A_1 = A_2 = A_3$



**Решение**

1. Рассмотрим далее неподвижный точечный заряд  $Q$ , расположенный в воздухе ( $\epsilon = 1$ ) 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. Модуль силы Кулона, возникающей при взаимодействии зарядов, запишется следующим образом

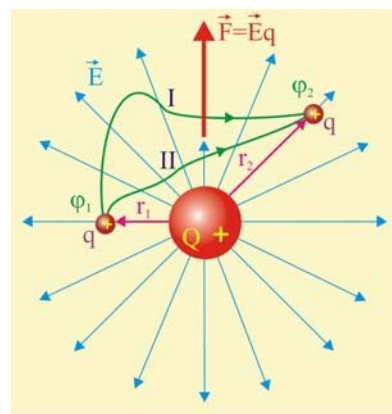
$$F_k = Eq = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2}.$$

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

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{qQ\vec{r}}{r^3} d\vec{r} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2}.$$



*Произвольные траектории*

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, как показано выше, 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

$$A_{1 \rightarrow 2} + A_{2 \rightarrow 1} = A_{1 \rightarrow 2} - A_{2 \rightarrow 1}.$$

Проинтегрируем уравнение работы

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

**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.**

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

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = K_2 - K_1.$$

**Работа, совершаемая в электростатическом поле, совершается за счёт уменьшения потенциальной энергии движущегося заряда**

$$A_{1 \rightarrow 2} = \Pi_2 - \Pi_1, \quad \delta A = -d\Pi.$$

Как и в механике, абсолютное значение потенциальной энергии не обладает значимым физическим смыслом, более актуальным является изменение энергии, в связи, с чем необходимо представлять, что при бесконечном удалении зарядов друг от друга потенциальная энергия их взаимодействия будет стремиться к нулю, чем можно воспользоваться, подставив значение  $r_2 \rightarrow \infty$  в уравнение работы

$$A_{1 \rightarrow \infty} = \Pi_2 - \Pi_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{\infty} - \frac{1}{r_1} \right) = -\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1} = \Pi_1.$$

**А3.** Точечный положительный заряд равномерно перемещают сначала вдоль линии напряженности электростатического поля, а затем в направлении, перпендикулярном этим линиям. Как соотносятся работы  $A_1$  и  $A_2$ , совершаемые силами электростатического поля на первом и втором участках траектории?

- 1)  $A_1 < A_2$
- 2)  $A_1 > A_2 = 0$
- 3)  $A_1 > A_2 \neq 0$
- 4)  $A_1 = A_2 = 0$

### Решение

1. Работа по перемещению заряда  $q$  в поле заряда  $Q$ :

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q\Delta\varphi;$$

2. При перемещении заряда перпендикулярно вектору напряжённости электрического поля  $\Delta\varphi = 0$ , поэтому:

$$A_1 > A_2; \quad A_2 = 0;$$

---

**А4.** В однородном электростатическом поле заряд перемещается по прямой  $ABC$  ( $AB = BC$ ). Работа, совершенная полем на участке  $AB$ , равна 100 Дж. Работа на участке  $BC$

- 1) равна 0
- 2) равна 100 Дж
- 3) равна 200 Дж
- 4) зависит от взаимного расположения прямой  $AB$  и линий напряженности поля

### Решение

$$A_{A \rightarrow B} = A_{B \rightarrow C} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q\Delta\varphi = 100 \text{ Дж};$$

---

### Разность потенциалов. Связь между напряженностью однородного электрического поля и разностью потенциалов

**А5.** Электрон перемещается под действием сил поля из точки с меньшим потенциалом в точку с большим потенциалом. Его скорость при этом

- 1) возрастает
- 2) убывает
- 3) не изменяется
- 4) зависит от направления начальной скорости

### Решение

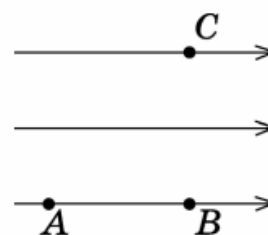
1. Сила Кулона, действующая на отрицательно заряженный электрон, направлена в сторону противоположную направлению вектора напряжённости поля, т.е. поле будет тормозить движение электрона, скорость будет убывать

$$A = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}; \quad A < 0; \quad \Rightarrow \quad v_2 < v_1;$$

---

**А6.** Три точки  $A$ ,  $B$  и  $C$  однородного поля показаны на рисунке. Как соотносятся потенциалы точек?

- 1)  $\varphi_A > \varphi_B > \varphi_C$
- 2)  $\varphi_A > \varphi_B = \varphi_C$
- 3)  $\varphi_A < \varphi_B < \varphi_C$
- 4)  $\varphi_A < \varphi_B = \varphi_C$



**Решение**

$$\Delta\varphi_{AB} > 0; \quad \Delta\varphi_{BC} = 0; \quad \Rightarrow \quad \varphi_A > \varphi_B = \varphi_C;$$

**А7.** Как изменится абсолютная величина работы электрического поля по перемещению электрона из одной точки поля в другую при увеличении разности потенциалов между точками в 3 раза?

- 1) уменьшится в 9 раз
- 2) уменьшится в 3 раза
- 3) увеличится в 3 раза
- 4) не изменится

**Решение**

$$A_{1 \rightarrow 2} = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q\Delta\varphi;$$

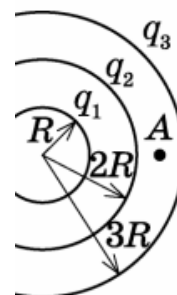
$$\Delta\varphi_1 < \Delta\varphi_2; \quad \Delta\varphi_2 = 3\Delta\varphi_1; \quad \Rightarrow \quad A_2 = 3A_1;$$

**В1.** Разность потенциалов между точками, расположенными на одной силовой линии однородного электрического поля, напряженность которого 50 В/м, равна 10 В. Чему равно расстояние между этими точками?

**Решение**

$$E = \frac{\Delta\varphi}{d}; \quad \Rightarrow \quad d = \frac{\Delta\varphi}{E} = 0,1 = 0,2\text{м} = 20\text{см};$$

**С1.** Точечный заряд  $q$  создает на расстоянии  $R$  от него электрическое поле с потенциалом  $\varphi_1 = 100$  В. Три концентрические сферы радиусами  $R_1 = R$ ,  $R_2 = 2R$  и  $R_3 = 3R$  имеют равномерно распределенные по их поверхностям заряды  $q_1 = +2q$ ,  $q_2 = +q$  и  $q_3 = +q$  соответственно (рис.). Каков потенциал поля в точке  $A$ , отстоящей от центра сфер на расстоянии  $R_4 = 2,5R$ ?



**Решение**

1. Для характеристики электрических полей оказалось более полезным рассматривать не силу Кулона в каждой точке поля, а отношение силы Кулона к пробному заряду, т.е. Величину напряженности поля  $\vec{E}$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_K}{q_0};$$

2 Уравнения работы показывают, что так же как и напряжённость, работа пропорциональна величине заряда. В этой связи целесообразно рассмотреть отношение работы к пробному заряду, что даст новую характеристику поля – **потенциал**

$$\varphi = \frac{A}{q_0}; \quad (1.16)$$

3. Различие между напряжённостью и потенциалом заключается в том, что вектор напряжённости характеризует конкретную точку поля, так же как и сила Кулона, а вот говорить о работе имеет смысл только в том случае, когда известно из какой точки поля началось движение и в какой точке оно закончилось.

4. Влияние поля на заряд пропорционально разности потенциальных энергий, измеряемой совершенной работой. Это означает, что отношение потенциальной энергии к величине заряда будет характерной величиной, которое можно рассматривать как энергетическую характеристику поля, как его **способность совершать работу** для каждой точки пространства, занятого электрическим полем. Таким образом,

$$\varphi = \frac{\Pi}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} = k \frac{q_1}{r};$$

5/ Сравнение уравнений позволяет прийти к важному выводу: **при перемещении заряда из одной точки поля в другую будет производиться работа только в том случае, если потенциалы этих точек не одинаковы, если  $\varphi_1 \neq \varphi_2$ .**

В системе СИ единицей потенциала является вольт

$$[\varphi] = \frac{[\Pi]}{[q]} = \frac{Дж}{Кл} = \frac{Н \cdot м}{Кл} = В.$$

6. Потенциалы, создаваемые поверхностными зарядами в точке А:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{R_A}; \quad \varphi_2 = k \frac{q_2}{R_A}; \quad \varphi_3 = k \frac{q_3}{3R};$$

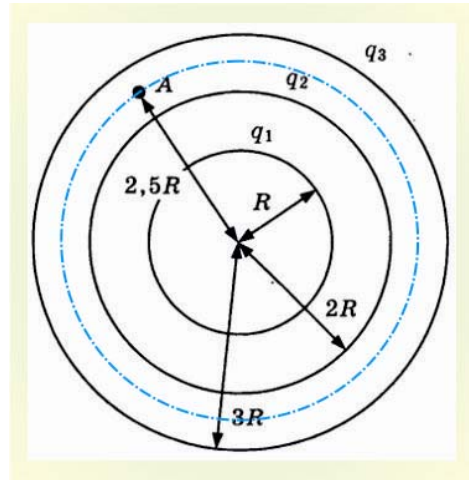
7. Потенциал поля в искомой точке:

$$\varphi_A = k \left( \frac{q_1 + q_2}{R_A} + \frac{q_3}{3R} \right);$$

8. По заданному потенциалу  $\varphi_1$  определим значение k:

$$\varphi_1 = k \frac{q_1}{R}; \Rightarrow k = \frac{\varphi_1 R}{q_1};$$

$$\varphi_A = \frac{\varphi_1 R}{q_1} \left( \frac{2q + q}{2,5R} + \frac{q}{3R} \right) = 100 \left( \frac{3}{2,5} + \frac{1}{3} \right) = 153В;$$

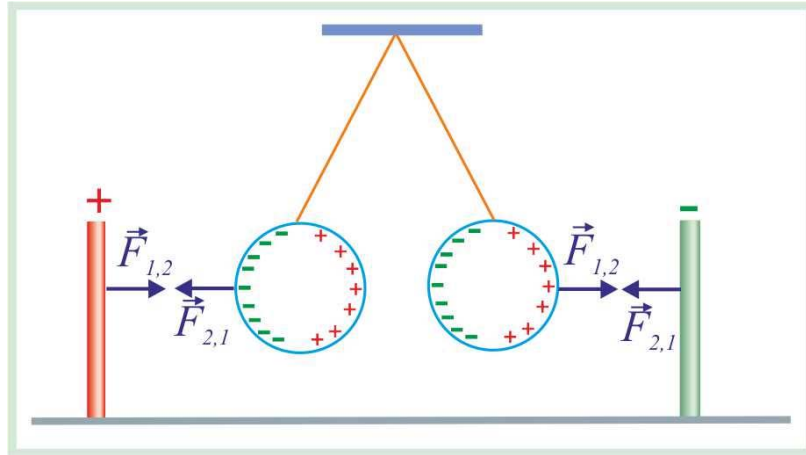


### Проводники в электрическом поле

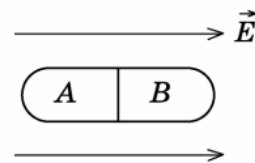
**А8.** Легкий незаряженный шарик из металлической фольги подвешен на тонкой шелковой нити. К шарiku поднесли (без прикосновения) сначала стержень с положительным электрическим зарядом, а затем стержень с отрицательным зарядом. Шарик

- 1) притягивается к стержням в обоих случаях
- 2) отталкивается от стержней в обоих случаях
- 3) не испытывает ни притяжения, ни отталкивания в обоих случаях
- 4) притягивается к стержню в первом случае, отталкивается от стержня во втором случае

### Решение

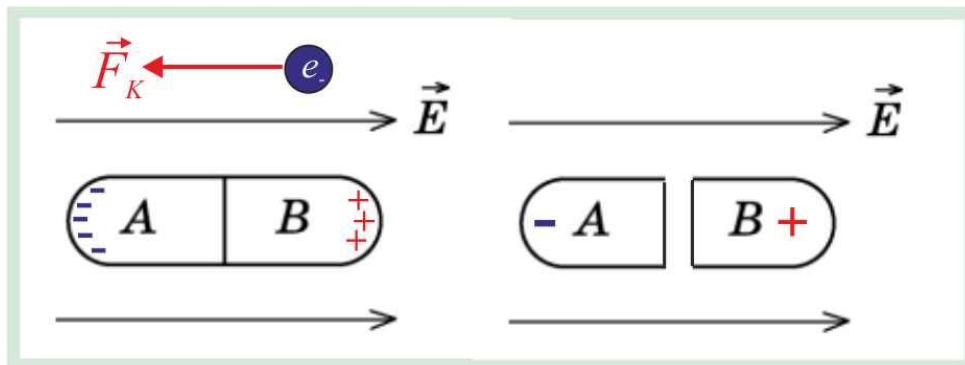


**А9.** Незаряженное металлическое тело внесено в однородное электростатическое поле, а затем разделено на части  $A$  и  $B$  (рис.). Какими электрическими зарядами будут обладать эти части после разделения?



- 1)  $A$  — положительным,  $B$  — отрицательным.
- 2)  $A$  — отрицательным,  $B$  — положительным.
- 3) Обе части останутся нейтральными.
- 4) Обе части станут положительными.

### Решение





**A10.** Металлический шар радиусом  $R$  находится в однородном поле  $\vec{E}_0$ . Точки  $A$  и  $B$  находятся внутри шара на диаметре, параллельном линии напряженности этого поля. Расстояние между точками  $R$ . Модуль напряженности поля  $E$  и потенциал  $\Phi$  для результирующего поля в этих точках соотносятся как

- 1)  $E_A = E_B = 0$ ;  $\Phi_A = \Phi_B$
- 2)  $E_A = E_B \neq 0$ ;  $\Phi_A = \Phi_B$
- 3)  $E_A = E_B = E_0$ ;  $\Phi_A = \Phi_B + E_0 R$
- 4)  $E_A = E_B = 0$ ;  $\Phi_A = \Phi_B + E_0 R$

### Решение

1. Поле равномерно заряженного с поверхностной плотностью заряда  $\sigma$  шара может быть описано посредством теоремы Остроградского – Гаусса для виртуальной сферической поверхности радиусом  $r$ , охватывающей шар:

$$\Phi_D = DS = D4\pi r^2 = q = \sigma S.$$

2. На основании уравнения можно найти величину напряжённости электрического поля, создаваемого равномерно заряженным проводящим шаром

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}.$$

3. Как видно, уравнение электрического поля равномерно заряженного проводящего шара совпадает с полем точечного заряда т.е. напряжённость обратно пропорциональна квадрату радиуса виртуальной сферы, на поверхности которой определяется модуль  $\vec{E}$ .

4. **Поле внутри шара, как и у всякого проводника будет нулевым, максимальное значение напряжённости будет иметь место на поверхности шара и будет уменьшаться пропорционально  $1/r^2$ .**

5. Если поле создаётся системой точечных зарядов  $\{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , то в заданной точке поля определяется потенциал от каждого источника, а затем производится алгебраическое суммирование значений, т.е.

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{q_i}{r_i},$$

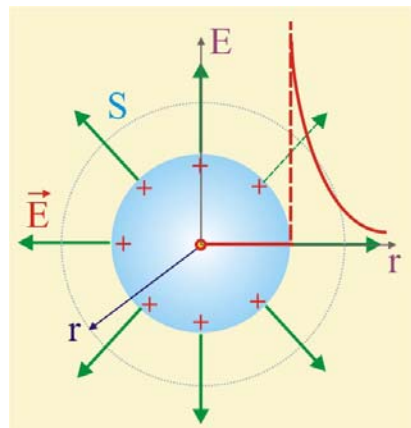
где  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды.

6. Если заряд  $Q$  равномерно распределён по поверхности шара радиусом  $R$ , то вне шара при  $(r > R)$  на расстоянии  $r$  потенциал создаваемого шаром поля определится уравнением

$$\Phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{Q}{r}.$$

7. Потенциал внутри диэлектрического шара

$$\Phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \frac{Q}{R} = \text{const}.$$

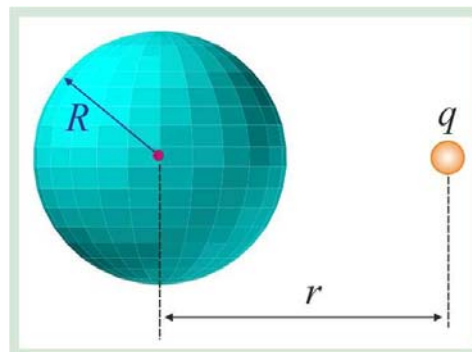


- В2.** Незаряженная проводящая сфера радиусом  $R = 20$  см находится в поле точечного заряда  $q = 10^{-8}$  Кл, расположенного на расстоянии  $r = 50$  см от центра сферы. Чему равен потенциал поля в центре сферы? Ответ округлить до целых.

### Решение

1. Напряжённость поля внутри сферы равна нулю, поэтому:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} = k \frac{q}{r} = 9 \cdot 10^9 \frac{10^{-8}}{0,5} = 180\text{В};$$



### Электрическая емкость. Конденсатор

**А11.** Емкость конденсатора — это

- 1) объем пространства между пластинами
- 2) суммарный объем его пластин
- 3) отношение суммарного заряда на пластинах к разности потенциалов между пластинами
- 4) отношение модуля заряда на одной пластине к разности потенциалов между пластинами

### Решение

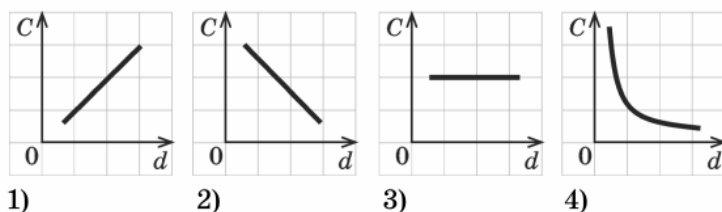
1. Если изолированному проводнику сообщить электрический заряд, то его потенциал будет прямо пропорционален этому заряду. Увеличение заряда проводника сопровождается пропорциональным изменением напряжённости электрического поля. Математически такую закономерность изменения потенциала в зависимости можно выразить простым уравнением

$$|Q| = C\Delta\varphi,$$

где  $Q$  — заряд проводника,  $\varphi$  — потенциал проводника,  $C$  — коэффициент пропорциональности, именуемый электрической ёмкостью, или сокращённо — ёмкостью

$$C = \frac{|Q|}{\Delta\varphi}, \quad [C] = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = 1\text{Фарад}.$$

**А12.** Зависимость электроемкости плоского конденсатора от расстояния между пластинами показана на графике



1)

2)

3)

4)

### Решение

Плоские, цилиндрические и сферические конденсаторы характеризуются ёмкостью, которую в общем виде можно представить следующим образом:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{Q}{U},$$

где  $U$  – разность потенциалов между обкладками, именуемая напряжением. Как показано выше, способность проводника сохранять на себе заряд зависит от его геометрии и физических свойств среды, заполняющей пространство между обкладками. Если заряд на обкладке конденсатора охарактеризовать плотностью, то применительно к плоскому случаю, напряжённость поля определится соотношением:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0 s},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды между обкладками,  $d$  – расстояние между обкладками,  $s$  – площадь обкладок. Разность потенциалов между обкладками можно представить следующим образом:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{Qd}{\varepsilon\varepsilon_0 s}.$$

Подставим значение разности потенциалов в уравнение ёмкости конденсатора:

$$C = \frac{Q\varepsilon\varepsilon_0 s}{Qd} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 s}{d}. \quad C \sim \frac{1}{d};$$

Ёмкость плоского конденсатора, таким образом, прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды и площади обкладок, обратно пропорциональна расстоянию между обкладками, этому соответствует зависимость 4.

---

**A13.** Если разность потенциалов между пластинами конденсатора увеличить в 3 раза, то его ёмкость

- 1) увеличится в 3 раза
- 2) уменьшится в 3 раза
- 3) не изменится
- 4) уменьшится в 9 раз

### Решение

1. Ёмкость конденсатора зависит от его геометрии и свойств диэлектрика между пластинами, разность потенциалов между пластинами на электрическую ёмкость конденсатора не влияют, вплоть до существенного нагрева и электрического пробоя диэлектрика.

---

**A14.** Ёмкость плоского конденсатора с квадратными пластинами со стороной 10 см, расположенными на расстоянии 1 мм друг от друга, в воздухе примерно равна

- 1) 10 пФ      2) 0,1 нФ      3) 1 мкФ      4) 0,1 мФ

### Решение

$$C = \frac{\varepsilon_0 s}{d} = \frac{9 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}}{10^{-3}} \approx 1 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} \approx 0,1 \text{ нФ};$$

---

- C2.** Конденсатор, электрическая ёмкость которого  $C_1 = 5$  мкФ, заряжен так, что разность потенциалов между его пластинами  $U_1 = 100$  В. Второй конденсатор, электрическая ёмкость которого  $C_2 = 10$  мкФ, имеет разность потенциалов между пластинами  $U_2 = 50$  В. Одноименно заряженные пластины конденсаторов попарно соединили проводниками. Чему равен модуль разности потенциалов  $U$  между пластинами каждого конденсатора?

### Решение

1. Конденсаторы характеризуются ёмкостью и предельной разностью потенциалов на обкладках. Для того чтобы получать конденсаторы заданной ёмкостью и рабочим напряжением применяют соединение в батарее. В батарее конденсаторы соединяются последовательно и параллельно.

2. При параллельном соединении конденсаторов каждый из них находится при одной и той же разности потенциалов, т.е.

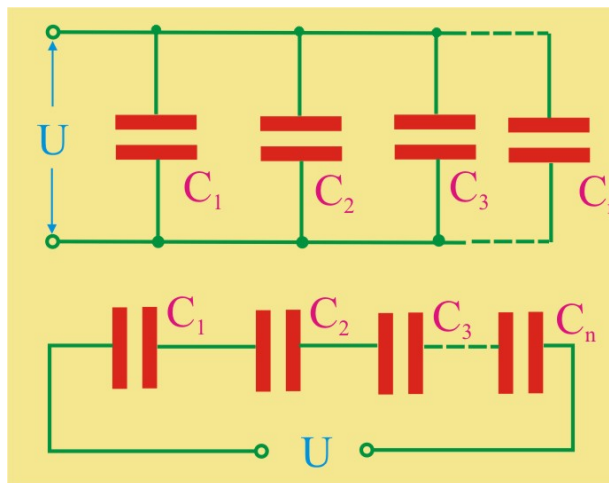
$$Q_1 = C_1 U, \quad Q_2 = C_2 U, \dots, Q_n = C_n U,$$

3. Общий заряд батареи будет определяться в виде суммы зарядов всех конденсаторов, составляющих схему

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} Q_n = U \sum_{i=1}^{i=n} C_i.$$

4. Для ёмкости батареи в этом случае можно записать следующее уравнение

$$C_{\Sigma} = \frac{Q_{\Sigma}}{U} = \sum_{i=1}^{i=n} C_i; \Rightarrow U = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2} = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 100 + 1 \cdot 10^{-5} \cdot 50}{15 \cdot 10^{-6}} = 66,7 \text{ В};$$



### Диэлектрики в электрическом поле

**A15.** Один раз в заряженный и отключенный от батарейки плоский конденсатор помещают стеклянную пластину. Она заполняет все пространство между пластинами конденсатора. Во второй раз раздвигают его пластины, при этом пространство между пластинами заполнено воздухом. Напряженность поля в пространстве между пластинами

- 1) в обоих случаях не изменяется
- 2) в обоих случаях увеличивается
- 3) в первом случае уменьшается, во втором — увеличивается
- 4) в первом случае уменьшается, во втором — не меняется

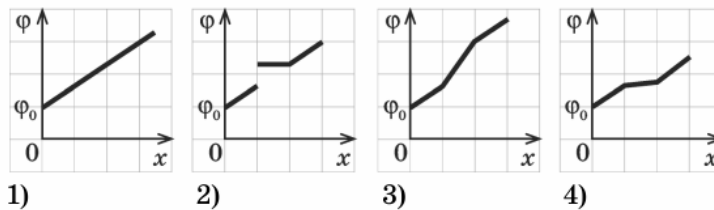
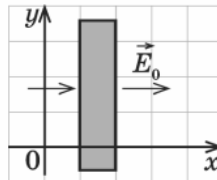
### Решение

1. При отключении конденсатора от источника и последующих манипуляциях величина заряда конденсатора

$$Q = CU = CE d; \Rightarrow E = \frac{Q}{Cd} = \frac{Q}{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}} = \frac{Q}{\varepsilon \varepsilon_0 S},$$

напряжённость электрического поля между пластинами конденсатора обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  и не зависит от расстояния между пластинами.

- A16.** Диэлектрическая пластинка находится в однородном электрическом поле с напряжённостью  $\vec{E}_0$ , перпендикулярной плоскости пластины. Какой из графиков правильно отражает изменение потенциала электрического поля при перемещении вдоль оси  $x$ ?



### Решение

1. Напряжённость поля в диэлектрике будет в  $\varepsilon$  раз меньше, чем в воздухе. Часть энергии электрического поля расходуется на поляризацию молекул диэлектрика

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{\varepsilon},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость. В этой связи наиболее правдоподобной является график 4. Хотя есть нюансы, всё зависит от типа диэлектрика.

- A17.** Две одинаковые по форме плоские параллельные пластинки изготовлены из разных материалов и помещены в однородное поле, при этом напряжённость поля перпендикулярна их плоскостям. Диэлектрическая проницаемость материала у первой пластины в 2 раза больше, чем у второй. Напряжённость поля в первой пластине
- 1) в 2 раза больше, чем во второй
  - 2) в 2 раза меньше, чем во второй
  - 3) в 4 раза больше, чем во второй
  - 4) такая же, как во второй

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q_1}{r}; \\ E_2 &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0 2\epsilon} \frac{q_1}{r}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = 2;$$

**В3.** Между пластинами заряженного плоского конденсатора вводят диэлектрическую пластину полностью заполняющую пространство между пластинами. Как при этом изменятся следующие величины: заряд на пластинах конденсатора; разность потенциалов между пластинами? Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

- 1) увеличится      2) уменьшится      3) не изменится

**Решение**

1. Если конденсатор отключен от источника, то в соответствие с законом сохранения заряда, величина последнего остаётся неизменной:

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

2. Напряжённость электрического поля в диэлектрике уменьшится в  $\epsilon$  раз

$$E_0 \approx \frac{U_0}{d}; \quad E = \frac{E_0}{\epsilon}; \quad \Rightarrow \quad U \approx \frac{U_0}{\epsilon}; \quad \Rightarrow \quad U < U_0;$$

Заряд на пластинах конденсатора	Разность потенциалов между пластинами
<b>3</b>	<b>2</b>

**С3.** Две заряженные бусинки падают в толстом слое органического растворителя с диэлектрической проницаемостью, равной 20. В некоторый момент они находятся на одной горизонтали на расстоянии 20 см друг от друга. Чему равен модуль проекции ускорений бусинок на горизонтальную ось, если масса каждой бусинки равна 0,2 г, а заряд 100 нКл и 200 нКл? Силу сопротивления растворителя не учитывать.

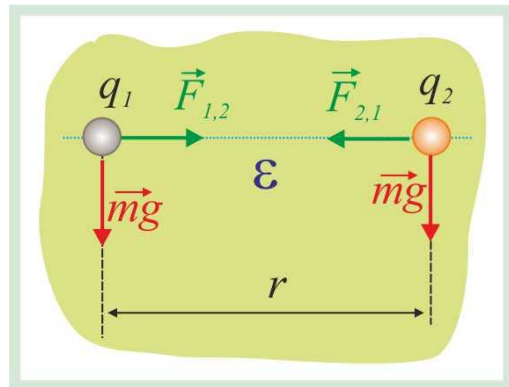
**Решение**

1. Сила Кулона, действующая на заряженные бусинки:

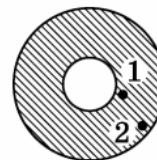
$$|\vec{F}_k| = |\vec{F}_{1,2}| = |\vec{F}_{2,1}| = \frac{k}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2};$$

2. Модуль проекции горизонтального ускорения:

$$|\vec{a}_x| = \frac{|\vec{F}_k|}{m} = \frac{k}{m\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \approx 1,125 \frac{M}{c^2};$$



- С4. Проводящий шар радиусом 10 см с зарядом 6 нКл окружен сферической оболочкой из диэлектрика радиусом 20 см (рис.). Диэлектрическая проницаемость вещества оболочки равна 3. Найдите напряженность поля вблизи внутренней (1) и внешней (2) поверхностей диэлектрика.



**Решение**

$$E_1 = \frac{k Q}{\varepsilon r^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{3} \frac{6 \cdot 10^{-9}}{10^{-2}} = 1800 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$E_2 = \frac{k Q}{\varepsilon R^2} = \frac{9 \cdot 10^9}{3} \frac{6 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-2}} = 450 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

### Энергия электрического поля конденсатора

- А18. Если раздвигать пластины конденсатора, присоединенного к клеммам гальванического элемента

- 1) энергия конденсатора уменьшается, так как увеличивается расстояние между положительными и отрицательными зарядами на пластинах
- 2) энергия конденсатора увеличивается, так как сила, раздвигающая пластины, совершает работу
- 3) энергия конденсатора уменьшается, поскольку при неизменной разности потенциалов между пластинами емкость конденсатора уменьшается
- 4) энергия конденсатора увеличивается, поскольку при неизменном заряде на пластинах конденсатора его емкость уменьшается

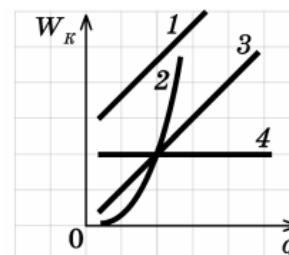
**Решение**

$$W = \frac{CU^2}{2}; \quad U = \text{const}; \quad C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}; \quad d \uparrow; \quad C \downarrow; \quad \Rightarrow \quad W \downarrow;$$

- В4. Какая из приведенных кривых отражает зависимость энергии плоского конденсатора от заряда на его пластине при неизменной емкости конденсатора?

**Решение**

$$W = \frac{q^2}{2C}; \quad \Rightarrow \quad W \sim C^2 - \text{зависимость 2.}$$



**A19.** Плоский воздушный конденсатор зарядили и отключили от источника тока. Как изменится энергия электрического поля внутри конденсатора, если расстояние между пластинами конденсатора уменьшить в 3 раза?

- 1) увеличится в 3 раза
- 2) уменьшится в 3 раза
- 3) увеличится в 9 раз
- 4) уменьшится в 9 раз

**Решение**

$$W_1 = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2}{2 \frac{\epsilon_0 S}{d_1}} = \frac{d_1 Q^2}{2 \epsilon_0 S}; \quad W_2 = \frac{Q^2}{2C_2} = \frac{Q^2}{2 \frac{\epsilon_0 S}{d_2}} = \frac{d_2 Q^2}{2 \cdot 3 \cdot \epsilon_0 S}; \quad \Rightarrow \quad W_1 > W_2;$$


---

**A20.** Заряженный до разности потенциалов 100 В конденсатор емкостью 1000 мкФ разряжают на резистор, опущенный в воду массой 10 г. На сколько градусов нагреется вода, если ее удельная теплоемкость 4200 Дж/(кг · К)?

- 1) 0,01 К
- 2) 0,1 К
- 3) 1 К
- 4) 10 К

**Решение**

1. Энергия электрического поля конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2};$$

2. В предположении, что вся энергия электрического поля без потерь преобразуется в тепло, закон сохранения энергии представится следующим образом:

$$\frac{CU^2}{2} = cm\Delta T; \quad \Rightarrow \quad \Delta T = \frac{CU^2}{2cm} = \frac{10^{-3} \cdot 10^4}{2 \cdot 4200 \cdot 10^{-2}} = 0,12 \text{ К};$$


---



### 3.3. Законы постоянного тока

#### Постоянный электрический ток. Сила тока

**A1.** Какое из явлений можно назвать электрическим током?

- 1) движение молоточка в электрическом звонке перед ударом о звонковую чашу
- 2) поворот стрелки компаса на север при ориентировании на местности
- 3) полет молекулы водорода между двумя заряженными шариками
- 4) разряд молнии во время грозы

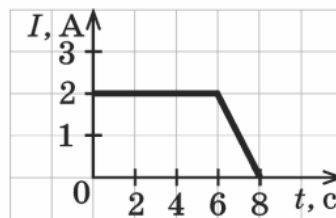
#### Решение

1. Электрическим током называется направленное движение носителей зарядов, обеспечиваемое электрическим полем.

2. В канале молнии происходит ионизация воздуха, возникают заряженные молекулы, которые и обеспечивают силу тока десятки тысяч ампер.



**A2.** На рисунке показана зависимость силы тока в проводнике от времени. Какой заряд прошел по проводу за 8 с?



- 1) 16 Кл      2) 14 Кл      3) 12 Кл      4) 6 Кл

#### Решение

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}; \Rightarrow \Delta Q = I\Delta t; \Delta Q = I_1\tau_1 + I_1 \frac{\tau_2}{2} = 2 \cdot 6 + 2 \cdot 1 = 14 \text{ Кл};$$

**A3.** Сила тока, согласно определению, равна

- 1)  $\sqrt{\frac{\Delta Q}{R\Delta t}}$  ( $\Delta Q$  — количество теплоты, выделившееся в проводнике сопротивлением  $R$  за время  $\Delta t$ )
- 2)  $\frac{\Delta q}{\Delta t}$  ( $\Delta q$  — заряд, прошедший через поперечное сечение

проводника,  $\Delta t$  — промежуток времени, в течение которого это произошло)

3)  $\frac{F}{Bl}$  ( $F$  — сила, действующая на проводник длиной  $l$  в магнитном поле индукцией  $\vec{B}$  ( $\vec{B} \perp \vec{l}$ ))

4)  $\frac{U}{R}$  ( $U$  — напряжение на концах проводника,  $R$  — его сопротивление)

**Решение**

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad \left[ \frac{\text{Кл}}{\text{с}} \equiv \text{А} \right];$$

**В1.** Время разряда молнии равно 3 мс. Сила тока в канале молнии около  $3 \cdot 10^4$  А. Какой заряд проходит по каналу молнии?

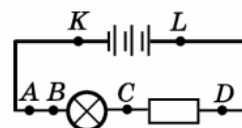
**Решение**

$$i = \frac{dq}{dt}, \quad \Rightarrow \quad \int_0^{\tau} i dt = \int_0^{\tau} dq; \quad \Rightarrow \quad Q = i_m \tau = 3 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 90 \text{ Кл};$$

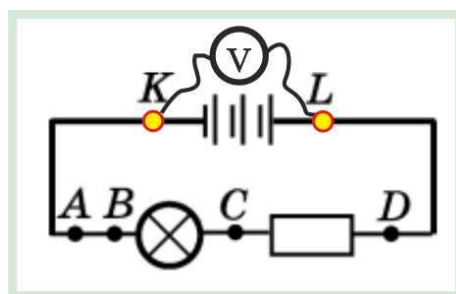
### Закон Ома для участка цепи. Напряжение

**А4.** Для измерения напряжения на источнике тока (рис.) вольтметр следует подключить к точкам

- 1) А и В
- 2) В и С
- 3) С и D
- 4) К и L

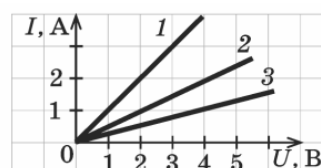


**Решение**



**А5.** Сравните сопротивления резисторов 1, 2, 3, для которых получены следующие вольтамперные характеристики

- 1)  $R_1 > R_2 > R_3$
- 2)  $R_3 > R_2 > R_1$
- 3)  $R_1 = R_2 = R_3$
- 4)  $R_1 > R_2 < R_3$



### Решение

1 Для протекания в проводнике постоянного тока  $I$  необходимо поддерживать постоянную напряжённость электрического поля. Так как напряжённость поля равна градиенту потенциала, взятого с обратным знаком

$$\vec{E} = -q \left( \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right),$$

то в данном случае

$$E = -\frac{d\varphi}{dl} = -\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{l} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{l} = \frac{U}{l};$$

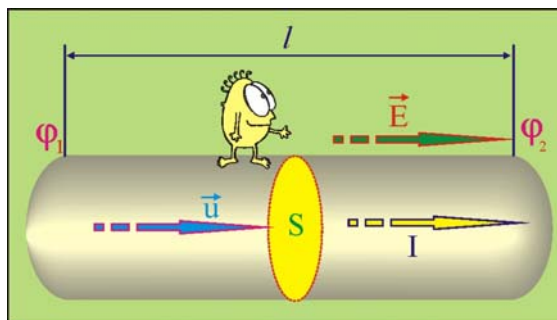
2. Георг Симон Ом в 1825 г. опубликовал работу, в которой установил экспериментально зависимость между силой тока  $I$  и напряжением на концах проводника  $U$  (закон Ома для участка цепи)

$$I = \frac{U}{R} = GU; \quad R = \frac{\rho l}{S},$$

где  $R$  – электрическое сопротивление, измеряемое в Омах,  $G$  – проводимость материала проводника,  $\rho$  – удельное сопротивление, измеряемое в Ом·м,  $S$  – площадь поперечного сечения проводника,  $l$  – его длина.

3. Подставляя в уравнение закона Ома значение сопротивления, получим:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}, \quad \Rightarrow \quad R_3 > R_2 > R_1;$$



**A6.** Если напряжение между концами проводника и его длину увеличить в 3 раза, то сила тока, идущего через проводник:

- 1) уменьшится в 3 раза
- 2) не изменится
- 3) увеличится в 3 раза
- 4) уменьшится в 9 раз

### Решение

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}; \quad \Rightarrow \quad \left. \begin{array}{l} I_1 = \frac{US}{\rho l}; \\ I_2 = \frac{3US}{3\rho l}; \end{array} \right\} \Rightarrow I_1 = I_2;$$

**A7.** При напряжении 2 В сила тока, идущего через металлический проводник длиной 2 м, равна 1 А. Какой будет сила тока через такой же проводник длиной 1 м при напряжении на нем 4 В?

- 1) 1 А
- 2) 0,5 А
- 3) 2 А
- 4) 4 А

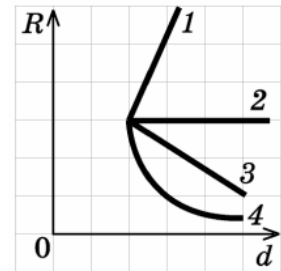
### Решение

$$I_1 = \frac{U_1 S}{\rho l_1}; \quad \Rightarrow \quad \frac{S}{\rho} = \frac{I_1 l_1}{U_1}; \quad \Rightarrow \quad I_2 = \frac{U_2 I_1 l_1}{U_1 l_2} = 4 \text{ А};$$

## Электрическое сопротивление

**A8.** Какой из графиков на рисунке правильно отражает зависимость электрического сопротивления длинного провода от его диаметра при постоянной температуре.

- 1) 1      2) 2      3) 3      4) 4



### Решение

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho \ell}, \quad R = \frac{\rho \ell}{S}; \quad S = \frac{\pi d^2}{4}; \quad \Rightarrow \quad R \sim \frac{1}{d^2} \quad \Rightarrow \quad \text{график 4.}$$

**A9.** Медная проволока имеет электрическое сопротивление 1,2 Ом. Чему равно электрическое сопротивление другой медной проволоки, у которой в 4 раза больше длина и в 6 раз больше площадь поперечного сечения?

- 1) 7,2 Ом  
2) 1,8 Ом  
3) 0,8 Ом  
4) 0,2 Ом

### Решение

$$R_1 = \frac{\rho \ell_1}{S_1}; \quad R_2 = \frac{\rho 4\ell_1}{6S_1}; \quad \Rightarrow \quad R_2 = \frac{4}{6}R_1 = 0,6 \text{ Ом};$$

**A10.** В таблице приведены данные, которые ученица получила, исследуя зависимость силы тока от напряжения на концах проводника.

$U, \text{ В}$	0,4	0,6	1,0	1,4	2,0
$I, \text{ А}$	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0

Исходя из этих данных сопротивление проводника

- 1) меняется в зависимости от напряжения на его концах  
2) равно 0,5 Ом  
3) равно 2 Ом  
4) определить невозможно

### Решение

$$I = \frac{U}{R}; \quad \Rightarrow \quad R = \frac{U}{I} \approx 2 \text{ Ом};$$

**A11.** Лампочка с вольфрамовой нитью соединена последовательно с источником тока и реостатом. При движении ползунка реостата лампочка горит все ярче и ярче. При этом сила тока через нить

- 1) растёт наряду с её сопротивлением
- 2) растёт, а её сопротивление уменьшается
- 3) падает наряду с её сопротивлением
- 4) падает, а её сопротивление растёт

**Решение**

1. Сопротивление нити накала зависит, кроме прочего, и от внешних условий, особенно от температуры вольфрама. Экспериментально установлено, что

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t);$$

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \cong 0,004 \frac{1}{^\circ\text{C}};$$

следовательно, растёт сила тока через лампочку и сопротивление спирали накаливания.

---

- C1.** Два длинных тонких проводника одинаковой длины, но разного сечения соединены последовательно. Радиус окружности в сечении первого проводника равен  $r_1$ , второго —  $r_2$ . Чему равно отношение напряженностей электрических полей в первом и втором проводниках  $\frac{E_1}{E_2}$  при подключении их к источнику постоянного тока, если оба проводника сделаны из одинакового материала?

**Решение**

1. При последовательном соединении сопротивлений сила тока через проводники будет одинаковой.

2. Напряжённость электрического поля в проводнике:

$$E_1 = \frac{U_1}{\ell_1} = \frac{IR_1}{\ell_1} = \frac{I \frac{\rho \ell_1}{S_1}}{\ell_1} = \frac{I\rho}{S_1} = \frac{I\rho}{\pi r_1^2};$$

$$E_2 = \frac{I\rho}{\pi r_2^2}; \Rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2;$$


---

**Электродвижущая сила.  
Закон Ома для полной электрической цепи**

**A12.** ЭДС источника тока — это

- 1) модуль сторонней силы, действующей на электрические заряды в источнике тока
- 2) работа сторонней силы, действующей на электрические заряды в источнике тока
- 3) отношение работы электростатической силы к заряду, перемещаемому внутри источника тока
- 4) отношение работы сторонней силы к заряду, перемещаемому внутри источника тока

**Решение**

1. Численно электродвижущая сила измеряется работой, совершаемой источником электрической энергии при переносе единичного положительного заряда по всей замкнутой цепи.

Если источник энергии, совершая работу  $A$ , обеспечивает перенос по всей замкнутой цепи заряда  $q$ , то его электродвижущая сила  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{Стор}}}{q}, \quad \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \equiv \text{В} \right];$$

**A13.** При внешнем сопротивлении цепи, равном внутреннему сопротивлению источника, сила тока равна  $I$ . Как изменится сила тока, если внешнее сопротивление цепи увеличить в 2 раза?

- 1) не изменится
- 2) увеличится в 2 раза
- 3) уменьшится в 1,5 раза
- 4) уменьшится в 2 раза

**Решение**

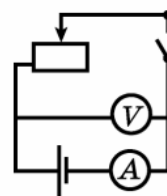
$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{\varepsilon}{r+R}; \quad R=r; \quad I_1 = \frac{\varepsilon}{2r}; \\ I_2 &= \frac{\varepsilon}{r+2r} = \frac{\varepsilon}{3r}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = 1,5;$$

**B2.** Чему равно внутреннее сопротивление источника тока с ЭДС, равной 20 В, если при подключении к нему резистора сопротивлением 8 Ом, сила тока в электрической цепи равна 2 А?

**Решение**

$$I = \frac{\varepsilon}{r+R}; \Rightarrow Ir + IR = \varepsilon; \quad \varepsilon - IR = Ir; \quad \Rightarrow r = \frac{\varepsilon - IR}{I} = \frac{\varepsilon}{I} - R = 10 - 8 = 2 \text{ Ом};$$

**B3.** В электрической цепи, изображенной на рисунке, ползунок реостата перемещают влево. Как изменились при этом ЭДС источника, показания вольтметра и амперметра?



Для каждой величины определите соответствующий характер ее изменения:

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

**Решение**

1. Внешнее сопротивление цепи уменьшается, сила тока в цепи увеличивается, а ЭДС источника остаётся постоянной величиной

$$I = \frac{\varepsilon}{r+R}; \quad U_V = IR = \varepsilon - Ir$$

ЭДС источника	Показания вольтметра
<b>3</b>	<b>1</b>

**В4.** В цепи из источника с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  и резистора с сопротивлением  $R$  в течение времени  $t$  течет ток.

Установите соответствие между физическими величинами и их значениями. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные буквы под соответствующими цифрами.

ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА	ЕЕ ЗНАЧЕНИЕ
А) напряжение на резисторе Б) работа сторонних сил	1) $\mathcal{E}$ 2) $\frac{\mathcal{E}^2 t}{R}$ 3) $\mathcal{E} \frac{R}{R+r}$ 4) $\frac{\mathcal{E}^2 t}{R+r}$

### Решение

1. Напряжение на резисторе:

$$U_R = IR = \frac{\mathcal{E}}{R+r} R; \Rightarrow 3;$$

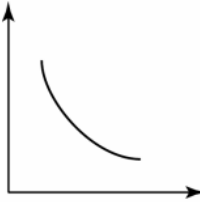
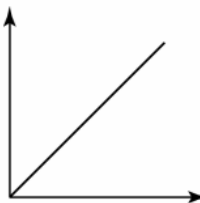
2. Работа сторонних сил:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{Ст}}}{q}; \quad A_{\text{Ст}} = \mathcal{E}q; \quad i = \frac{dq}{dt}; \quad q = It; \quad A_{\text{Ст}} = \mathcal{E}It = \frac{\mathcal{E}^2 t}{R+r};$$

А	Б
3	4

**В5.** Установите соответствие между зависимостью одной величины, характеризующей электрическую цепь, от другой характеристики той же цепи и формой графика, который описывает эту зависимость.

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

ЗАВИСИМОСТЬ	ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ
А) зависимость силы тока через резистор от напряжения на его концах Б) зависимость мощности выделяющейся на резисторе от напряжения на его концах	1)  2) 

ЗАВИСИМОСТЬ	ГРАФИК ЗАВИСИМОСТИ
	<p>3)</p>
	<p>4)</p>

1. Зависимость силы тока через резистор от напряжения на его концах:

$$I = \frac{U}{R}; \quad \frac{1}{R} = \zeta; \quad I = \zeta U; \quad \Rightarrow \quad 2;$$

2. Зависимость мощности, выделяющейся на резисторе, от напряжения на его концах:

$$P = IU = \frac{U}{R}R = \frac{U^2}{R}; \quad \Rightarrow \quad P = \zeta U^2; \quad \Rightarrow \quad 3;$$

А	Б
2	3

### Параллельное и последовательное соединение проводников

**A14.** Отношение сил тока в двух параллельно соединенных резисторах с различным сопротивлением

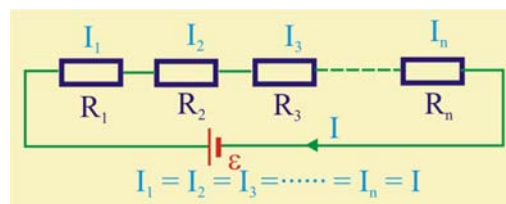
- 1) пропорционально отношению их сопротивлений
- 2) равно 1
- 3) обратно пропорционально отношению их сопротивлений
- 4) зависит от силы тока на участке перед этими резисторами

#### Решение

1. В электрических схемах используется последовательное и параллельное соединение сопротивлений, а так же их комбинация. При последовательном соединении через все сопротивления в соответствии с законом сохранения заряда протекает ток одинаковой силы

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n = I,$$

а падение на каждом сопротивлении будет индивидуальным:





$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 + \dots + IR_n, \quad U = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n).$$

2. С другой стороны, на основании закона Ома –  $U = IR_\Sigma$ , откуда следует, что

$$R = \sum_{i=1}^{i=n} R_i.$$

3. При последовательном соединении сопротивлений полное сопротивление равно сумме отдельных сопротивлений, составляющих схему, а падение напряжения на каждом сопротивлении пропорционально его величине, так что

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n.$$

4. Параллельное соединение сопротивлений (рис. 5.18) характеризуется тем, что на каждом сопротивлении падение напряжения будет одинаковым

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_n.$$

5. По закону сохранения заряда при любом способе ветвления цепи заряд разделится по отдельным ветвям сообразно их электрическим сопротивлениям, но сумма зарядов, пришедших к точке ветвления должно быть равно сумме зарядов, покинувших её, другими словами

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n,$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots + \frac{U}{R_n},$$

$$I = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) U.$$

6. С другой стороны, по закону Ома

$$I = \frac{U}{R_\Sigma},$$

поэтому

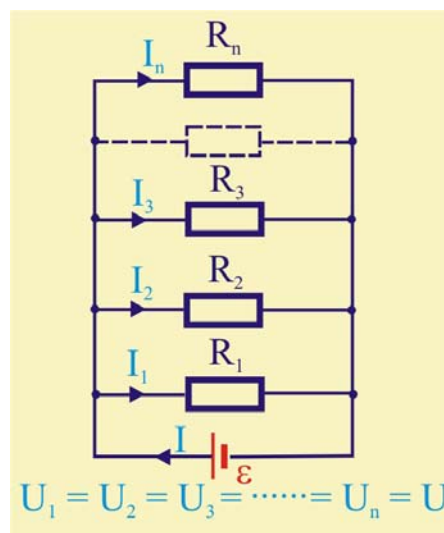
$$\frac{1}{R_\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_i}.$$

7. В случае соединения в параллель двух сопротивлений

$$R_\Sigma = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

8. Применительно к данной задаче:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1};$$

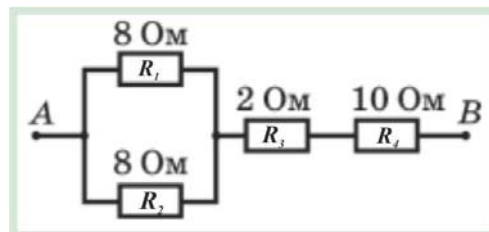


**В6.** Чему равно сопротивление между точками А и В электрической цепи, представленной на рисунке?

**Решение**

$$R_\Sigma = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 + R_4;$$

$$R_\Sigma = \frac{64}{16} + 2 + 10 = 16 \text{ Ом};$$



**A15.** Два резистора сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  соединены последовательно, показания идеальных вольтметров, присоединенных к концам этих резисторов,  $U_1$  и  $U_2$

1) могут быть произвольными

2) равны между собой

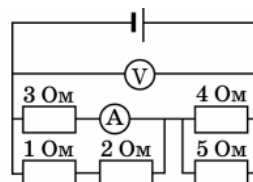
3) таковы, что  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$

4) таковы, что  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_2}{R_1}$

**Решение**

$$I = \frac{U_1}{R_1}; \quad I = \frac{U_2}{R_2}; \quad \Rightarrow \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2};$$

**A16.** Показание вольтметра V на схеме равно 3,7 В. Каково показание амперметра A? Сопротивления резисторов указаны на рисунке. Сопротивлением амперметра пренебречь.



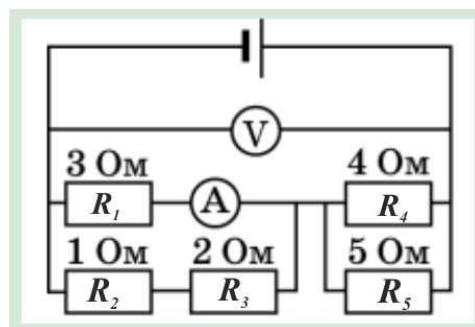
- 1) 0,25 А      2) 0,62 А      3) 1 А      4) 0,5 А

**Решение**

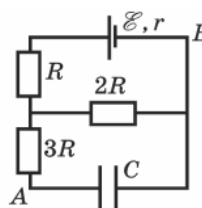
$$\mathfrak{R} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + (R_2 + R_3)} + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5};$$

$$\mathfrak{R} = \frac{3 \cdot 3}{6} + \frac{20}{9} \approx 1,5 + 2,2 \approx 3,7 \text{ Ом};$$

$$I_{\Sigma} = \frac{U_V}{\mathfrak{R}} = 1 \text{ А}; \quad \Rightarrow \quad I_A = \frac{I_{\Sigma}}{2} = 0,5 \text{ А};$$



**C2.** Чему равна энергия конденсатора емкостью  $C$ , подключенного по электрической схеме, представленной на рисунке? Величины  $\mathcal{E}$ ,  $R$  и  $r$  считать известными.



**Решение**

1. Энергия, запасаемая в конденсаторе:

$$W = \frac{CU_C^2}{2}; \quad U_C = U_{2R} = I \cdot 2R;$$

2. Сила тока через источник:

$$I_{2R} = \frac{\mathcal{E}}{r + \mathfrak{R}}; \quad \mathfrak{R} = 3R; \quad I_{2R} = \frac{\mathcal{E}}{r + 3R};$$

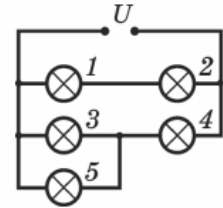
3. Падение напряжения на конденсаторе:

$$W = \frac{C}{2} \left( \frac{\varepsilon}{r + 3R} \right)^2 (2R)^2 = \frac{2C\varepsilon^2 R^2}{(r + 3R)^2};$$

**Работа электрического тока.  
Закон Джоуля — Ленца**

**A17.** Одинаковые лампочки соединены по схеме (рис.). Считая сопротивление лампочек не зависящим от температуры, определите, какая из них горит ярче остальных.

- 1) 1 и 2      2) 3      3) 4      4) 5



**Решение**

$$R_{1,2} = 2R; \quad R_{3,4,5} = 1,5R; \quad \Rightarrow \quad I_{3,4,5} > I_{1,2}; \quad I_4 = I_3 + I_5; \quad \Rightarrow \quad I_4 \equiv I_{\max};$$

**A18.** Два резистора, имеющие сопротивления  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 2$  Ом, включены в цепь постоянного тока параллельно друг другу. Чему равно отношение мощностей электрического тока  $\frac{N_1}{N_2}$  на этих резисторах?

- 1) 1 : 1      2) 1 : 2      3) 2 : 1      4) 4 : 1

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= \frac{U^2}{R_1}; \\ N_2 &= \frac{U^2}{R_2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{2}{1};$$

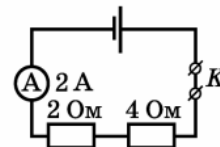
**B7.** При силе тока в электрической цепи 0,6 А сопротивление лампы равно 5 Ом. Чему равна мощность электрического тока, выделяющаяся на нити лампы?

**Решение**

$$N = UI = I^2 R = 1,8 \text{ Вт};$$

**A19.** Изучая закономерности соединения резисторов, ученик собрал электрическую цепь (см. рис.) и измерил силу тока в ней. Какое количество теплоты выделится на резисторах при протекании тока в течение 1 мин?

- 1) 3 Дж      2) 6 Дж      3) 24 Дж      4) 1440 Дж



### Решение

1. Сопротивление цепи:

$$R = R_1 + R_2;$$

2. Падение напряжения на сопротивлениях:

$$U = IR = I(R_1 + R_2);$$

3. Количество выделившейся за время  $\tau$  теплоты:

$$Q = I^2(R_1 + R_2)\tau = 0,36 \cdot 6 \cdot 60 = 1440 \text{ Дж};$$

---

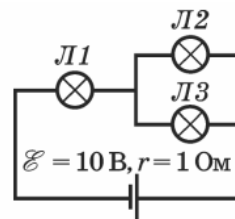
**С3.** В электрический кофейник налили воду объемом 0,32 л при температуре 30 °С и включили нагреватель. Через какое время после включения выкипит вся вода, если мощность нагревателя равна 2 кВт, КПД нагревателя 0,8? Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг · К). Удельная теплота парообразования воды 2256 кДж/кг.

### Решение

$$\eta N \tau = cm\Delta t + \lambda m; \Rightarrow \tau = \frac{m(c\Delta t + \lambda)}{\eta N} = 510 \text{ с};$$

---

**С4.** Три лампы с маркировкой Л1 (3 В, 3 Ом), Л2 (2 В, 1 А) и Л3 (3 В, 4,5 Вт) соединены по схеме на рисунке. Какое количество теплоты выделится на лампе Л3 за 1 минуту? Считать, что сопротивление ламп не зависит от температуры.



### Решение

1. Сопротивление ламп:

$$R_1 = 3 \text{ Ом}; \quad R_2 = \frac{U}{I} = 2 \text{ Ом}; \quad R_3 = \frac{U^2}{N} = 2 \text{ Ом}; \quad R_0 = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 4 \text{ Ом};$$

2. Сила тока в цепи третьей лампы:

$$I = \frac{\varepsilon}{r + R} = \frac{10}{5} = 2 \text{ А}; \Rightarrow I_3 = \frac{I}{2} = 1 \text{ А};$$

3. Количество теплоты, выделившейся на третьей лампе:

$$Q_3 = I_3^2 R_3 \tau = 1 \cdot 2 \cdot 60 = 120 \text{ Дж};$$

---

### 3.4. Токи в разных средах

#### Носители свободных электрических зарядов в металлах, жидкостях, газах и вакууме

**A1.** Ток в металлах создается движением

- 1) электронов
- 2) только положительных ионов
- 3) отрицательных и положительных ионов
- 4) только отрицательных ионов

#### Решение

1. Проводники являются таковыми по причине наличия в них большого числа носителей заряда, способных относительно легко перемещаться в пределах рассматриваемого образца.

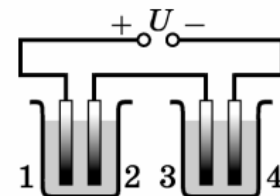
2. Металлы, как правило, являются хорошими проводниками тепла и электрического тока именно благодаря свободным электронам. Если металлический проводник поместить в однородное электрическое поле напряжённостью  $\vec{E}$ , то на каждый свободный электрон ( $e \cong 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_e \cong 1 \cdot 10^{-30}$  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).

---

**A2.** На рисунке показаны два сосуда с раствором медного купороса, соединенные последовательно с источником тока, напряжение на выходных клеммах которого и полярность клемм заданы. На каких из угольных электродов, опущенных в сосуды, будет выделяться медь при пропускании тока через раствор?

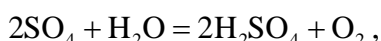
- 1) только на 1
- 2) только на 4
- 3) только на 2 и 3
- 4) только на 2 и 4

#### Решение



1. Химическое действие электрического тока можно наблюдать, пропуская его через водный раствор медного купороса  $\text{CuSO}_4$ , в качестве электродов лучше всего использовать угольные стержни, но можно и из другого проводника, например, тривиальные гвозди. Соединив электроды с аккумуляторной батареей, и выждав некоторое время (несколько минут), **можно обнаружить на отрицательном угольном электроде хорошо заметный невооружённым взглядом налёт блестящего слоя меди.** На положительном электроде станет выделяться остаток  $\text{SO}_4$ , но он не обна-

руживается, потому что в присутствии воды превращается в серную кислоту и молекулярный кислород



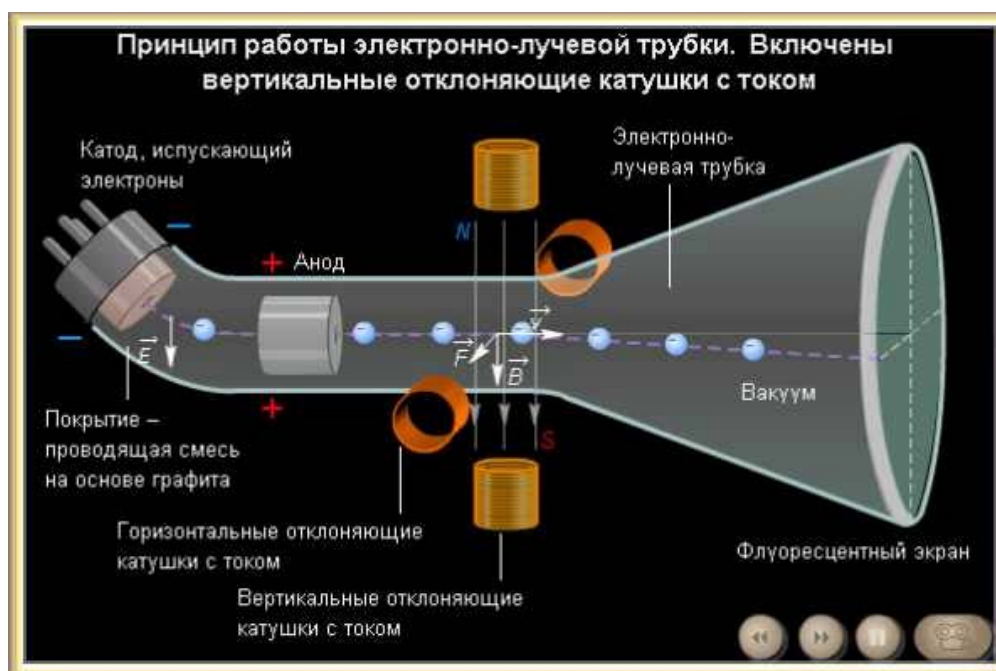
т.е. в растворе появится серная кислота, а на положительном электроде будет выделяться газообразный кислород. При силе тока через раствор более 5 А положительный электрод будет покрыт мелкими пузырьками, которые коагулируют и укрупняются и под действием силы Архимеда всплывают на поверхность раствора.

2. Медь будет выделяться на электродах 2 и 4.

**А3.** Электронная пушка создает пучок электронов в стеклянной вакуумированной камере. Все электроны, покинувшие раскаленный катод пушки, покидают катод и ударяются в экран электронно-лучевой трубки. Если увеличить ускоряющее напряжение в пушке в 2 раза, то сила тока, идущего в вакууме через трубку:

- 1) не изменится
- 2) возрастет примерно в  $\sqrt{2}$  раз
- 3) возрастет примерно в 2 раза
- 4) возрастет примерно в 4 раза

### Решение



1. Ускоряющее напряжение определяет кинетическую энергию электронов, следовательно, и их скорость, которая определяет силу тока:

$$eU = \frac{mv^2}{2}; \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}; \left. \begin{array}{l} v_1 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}; \\ v_2 = \sqrt{\frac{4eU}{m}}; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \sqrt{2}$$

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(N_e e)}{dt}; \quad i \approx v; \Rightarrow \frac{i_2}{i_1} \approx \sqrt{2};$$

**В1.** Источник тока присоединили к двум пластинам, опущенным в раствор поваренной соли. Сила тока в цепи равна 0,2 А. Какой заряд проходит между пластинами в ванне за 2 мин?

**Решение**

$$i = \frac{dq}{dt}, \Rightarrow \int_0^{\tau} idt = \int_0^{\tau} dq; \Rightarrow Q = i \cdot \tau = 0,2 \cdot 120 = 24 \text{ Кл};$$

**Полупроводники.**

**Собственная проводимость полупроводников**

**А4.** Какими носителями электрического заряда создается ток в полупроводниках, не содержащих примесей?

- 1) только электронами
- 2) только ионами
- 3) электронами и ионами
- 4) электронами и дырками

**Решение**

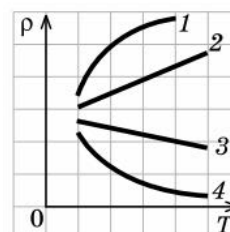
1. При относительно низких температурах в полупроводниках все электроны связаны с ядрами и их сопротивление достаточно большое. при увеличении температуры кинетическая энергия частиц увеличивается, рушатся связи и возникают свободные электроны – сопротивление уменьшается. Свободные электроны перемещаются противоположно вектору напряженности приложенного к полупроводнику электрического поля. Электронная проводимость полупроводников обусловлена наличием свободных электронов.

2. При увеличении температуры разрушаются ковалентные связи, осуществляемые валентными электронами, между атомами и образуются места с недостающим электроном – "дырка". Она может перемещаться по всему кристаллу, т.к. ее место может замещаться валентными электронами. Перемещение "дырки" равноценно перемещению положительного заряда. Перемещение дырки происходит в направлении вектора напряженности электрического поля.

**А5.** Какой из приведенных графиков зависимости удельного сопротивления материала от температуры относится к полупроводникам?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

**Решение**



1. В полупроводниковом кристалле между соседними ионами кристаллической решётки существует, как правило, ковалентная связь, т.е. у двух ионов имеются общие электроны.

2. Чтобы ковалентная связь разрушилась, электроны должны получить энергию извне, которая называется энергией активации (энергией ионизации)  $\epsilon_A$ , величина этой энергии во много раз превышает энергию теплового движения:

$$\epsilon_A \gg \epsilon_T \approx \frac{3}{2} k_B T \approx 0,04 \text{ эВ};$$

Энергия активации для кремния:

$$\varepsilon_A(\text{Si}) \approx 1,1 \text{ эВ};$$

3. Зависимость количества свободных электронов, освобождающихся при разрушении ковалентных связей, от температуры обуславливает зависимость сопротивления полупроводников от температуры, причём эта зависимость носит экспоненциальный характер:

$$R(T) = R_0 e^{\frac{\varepsilon_A}{2k_B T}} = R_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{2k_B T}\right),$$

4. Из приведенных в задаче зависимостей  $\rho = f(T)$  наиболее приемлемой является график 4.

**A6.** Стержни из металла и полупроводника нагревают на  $\Delta T$  градусов каждый. При этом

- 1) сопротивление обоих стержней уменьшится
- 2) сопротивление обоих стержней увеличится
- 3) сопротивление металлического стержня уменьшится, а сопротивление стержня из полупроводника увеличится
- 4) сопротивление металлического стержня увеличится, а сопротивление стержня из полупроводника уменьшится

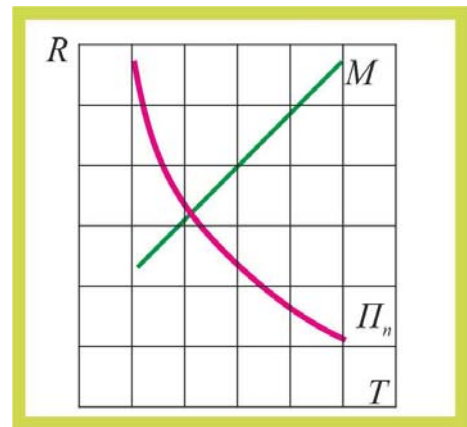
### Решение

1. Зависимость электрического сопротивления металлического образца от температуры:

$$R(T) = R_0(1 - \alpha \Delta T);$$

2. Зависимость электрического сопротивления полупроводника от температуры:

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{\varepsilon_A}{2k_B T}\right);$$



**A7.** При нагревании на несколько градусов сопротивление полупроводника без примесей уменьшилось в 100 раз. Это объясняется тем, что

- 1) примерно в 100 раз увеличилась скорость направленного движения свободных носителей заряда
- 2) примерно в 100 раз увеличилась концентрация свободных носителей заряда
- 3) примерно в 10 раз увеличились и концентрация свободных носителей заряда, и скорость их направленного движения
- 4) примерно в 1000 раз увеличилась концентрация свободных носителей и в 10 раз уменьшилась скорость их направленного движения

### Решение

1. Электрическое сопротивление

$$R_1 = \frac{\rho_1 \ell}{S} \quad \rho = f(n_e); \quad R_2 = \frac{\rho_2 \ell}{S}; \quad \frac{R_1}{R_2} \approx \frac{n_2}{n_1} \approx 100;$$



## Примесная проводимость полупроводников

- A8.** В четырехвалентный кремний добавили в первом опыте трехвалентный химический элемент, а во втором — пентавалентный элемент. Каким типом проводимости в основном будет обладать полупроводник в каждом случае?
- 1) в первом случае — дырочной, во втором случае — электронной
  - 2) в первом случае — электронной, во втором случае — дырочной
  - 3) в обоих случаях электронной
  - 4) в обоих случаях дырочной

### Решение

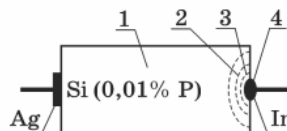
1. Валентностью называется способность атома к образованию химических связей. Количественной мерой валентностью обычно принято считать число других атомов в молекуле.

2. В первом случае атом кремния присоединит три атома другого элемента, т.е. образуется "дырка" и проводимость будет дырочной.

3. Во втором случае, "лишними" останутся два электрона и проводимость будет электронной.

---

- A9.** На рисунке показана схема полупроводникового диода, который изготавливают, капая расплавленный трехвалентный индий на примесный кремниевый полупроводник, в котором содержится небольшая примесь пентавалентного фосфора. В какой из зон основными носителями заряда являются дырки?



- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

### Решение

1. На схеме показан P-n – переход – зона которая возникает на границе двух полупроводников с различной проводимостью. При соединении двух полупроводников возникает взаимная диффузия электронов и дырок. Электроны уходя из – n-области оставляют на границе положительно заряжены атомы донорской примеси. Дырки уходя из p-области оставляют отрицательно заряженные атомы акцепторной примеси. Образовавшийся слой называется P-n – переходом. Диффузия будет происходить до тех пор пока электрическое поле P-n – перехода увеличится на столько, что будет способно отталкивать дырки и электроны, которые стараются пройти зону P-n – перехода.

2. Область 2 будет насыщена отрицательно заряженными атомами, проводимость этой области будет преимущественно "дырочной".

---

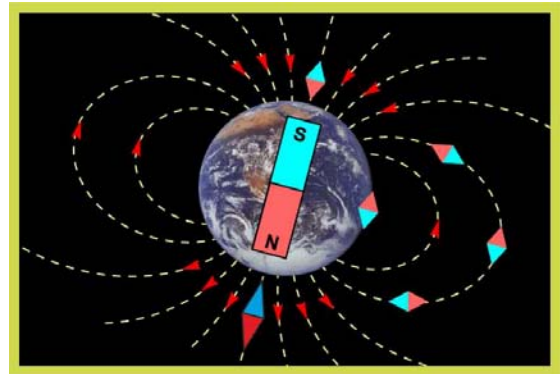
### 3.5. Магнитное поле. Движение частиц в магнитном поле

#### Взаимодействие магнитов. Магнитное поле. Индукция магнитного поля

- A1.** Направление вектора индукции магнитного поля в данной точке пространства совпадает с направлением
- 1) силы, действующей на неподвижный заряд в этой точке
  - 2) силы, действующей на движущийся заряд в этой точке
  - 3) северного полюса магнитной стрелки, помещенной в эту точку
  - 4) южного полюса магнитной стрелки, помещенной в эту точку

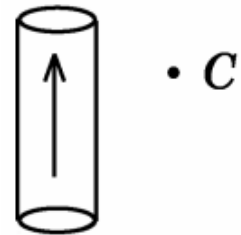
#### Решение

1. Северный полюс магнитной стрелки совпадает по направлению с вектором магнитной индукции поля в данной точке пространства, как это видно на примере ориентации стрелки в магнитном поле Земли.

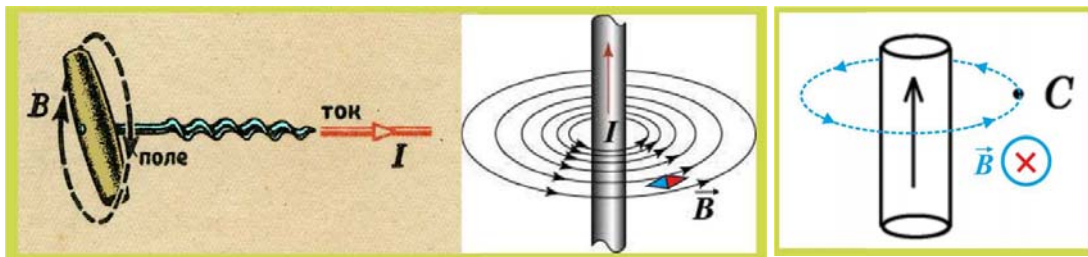


- A2.** На рисунке изображен проводник, через который идет электрический ток. Направление тока указано стрелкой. Как направлен вектор магнитной индукции в точке  $C$ ?

- 1) в плоскости чертежа  $\uparrow$
- 2) от нас перпендикулярно плоскости чертежа  $\otimes$
- 3) к нам перпендикулярно плоскости чертежа  $\odot$
- 4) вектор магнитной индукции в точке  $C$  равен нулю



#### Решение



**А3.** Электромагнит представляет собой медный провод, намотанный на стальной сердечник. При силе тока  $I$  в сердечнике электромагнит удерживает гирию массой  $m$ . Для увеличения массы удерживаемого груза, не меняя формы сердечника, следует:

- 1) уменьшить число витков
- 2) увеличить силу тока
- 3) заменить стальной сердечник на медный
- 4) изменить направление намотки провода на сердечник

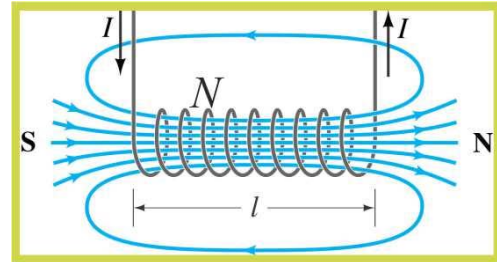
**Решение**

1. Величина модуля магнитной индукции соленоида на его оси:

$$B \approx \mu\mu_0 \frac{IN}{\ell},$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость сердечника,  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $I$  – сила тока,  $N$  – число витков,  $\ell$  – длина соленоида,  $\mu_{Cu} \approx 10^{-6}$  Гн/м,  $\mu_{Fe} \approx 10^{-4}$  Гн/м.

2. Для выполнения поставленной задачи надо увеличивать силу тока, пропускаемого по соленоиду.



**В1.** Максимальная сила, действующая в однородном магнитном поле на проводник с током длиной 10 см равна 0,02 Н. Сила тока равна 8 А. Чему равен модуль вектора магнитной индукции этого поля?

**Решение**

$$F_m = IB\ell; \quad |\vec{B}| = \frac{F_m}{I\ell} = \frac{0,02}{0,1 \cdot 8} = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Тл};$$

**Сила Ампера**

**А4.** Как взаимодействуют два параллельных друг другу проводника, если в первом случае электрический ток в них идет в одном направлении, а во втором случае — в противоположных направлениях?

- 1) в обоих случаях притягиваются друг к другу
- 2) в обоих случаях отталкиваются друг от друга
- 3) в первом случае притягиваются, а во втором случае отталкиваются друг от друга
- 4) в первом случае отталкиваются, а во втором случае притягиваются друг к другу

**Решение**

1. Ампер и его многочисленные последователи опытным путём установили, что на проводники с током действуют механические силы, вызванные наличием магнитного поля. Это действие можно описать количественно. Если поперечное сечение

проводника  $S$ , а его длина в направлении тока  $l$ , то электрический заряд, сосредоточенный в элементарном объёме  $dV = Sdl$ , будет определяться количеством сосредоточенных в нём носителей заряда, в частности – электронов

$$dN = ndV = nSdl ,$$

суммарный электрический заряд которых определится как

$$dQ = qdN = qnSdl ,$$

где  $q$  – заряд носителя,  $n$  – концентрация носителей. Силу, действующую на элемент кристаллической решётки в рассматриваемом элементе проводника, можно определить из условий равновесия электрических и магнитных сил

$$quB = qE, \Rightarrow E = Bu ,$$

где  $u$  – скорость движения зарядов в проводнике.

2. Выразим дрейфовую скорость носителей заряда через плотность тока, текущего по проводнику

$$u = \frac{j}{qn}, \quad E = \frac{Bj}{qn} .$$

3. Искомую элементарную силу, таким образом можно представить следующим образом

$$dF_A = EdQ = \frac{B}{qn} j \cdot qnSdl = IBdl .$$

4. В векторной форме сила, действующая на элементарную длину проводника  $d\vec{\ell}$ , по которому течёт ток величиной  $I$ , определится векторным соотношением

$$d\vec{F}_A = I(d\vec{\ell} \times \vec{B}) .$$

5. В случае прямолинейного проводника магнитная индукция во всех точках пространства вдоль всей его длины  $l$  будет постоянной

$$\vec{F}_A = I(\vec{\ell} \times \vec{B}) ,$$

или, в соответствии с определением векторного произведения

$$F_A = I\ell B \sin(\vec{\ell}; \vec{B}) .$$

6. Вектор действующей силы будет перпендикулярен плоскости, в которой располагаются векторы  $\vec{\ell}$  и  $\vec{B}$ . Уравнение является математическим выражением закона Ампера.

7. Закон Ампера применим для вычисления взаимодействия двух проводников с током.

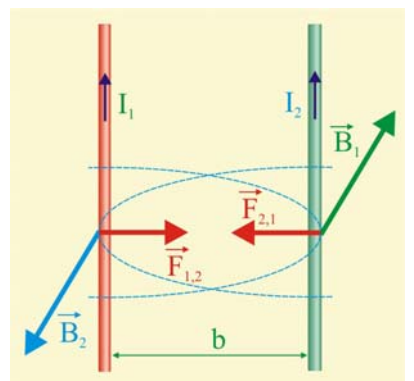
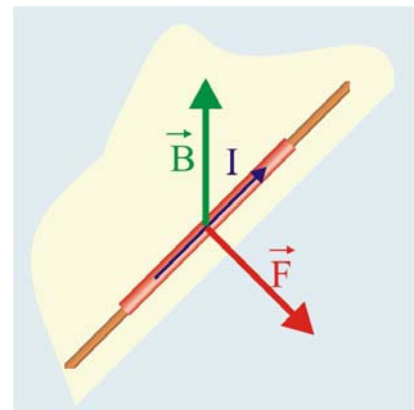
8. Пусть по двум длинным прямолинейным проводникам протекают в одном направлении токи величиной  $I_1$  и  $I_2$ . Проводник с током  $I_1$  в области расположения другого проводника создаёт магнитное поле с индукцией

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b} .$$

При этом, элемент второго проводника на своей длине  $\Delta l$  будет испытывать силу величиной

$$F_{2,1} = B_1 I_2 \Delta l .$$

Совмещая два последних уравнения, получим



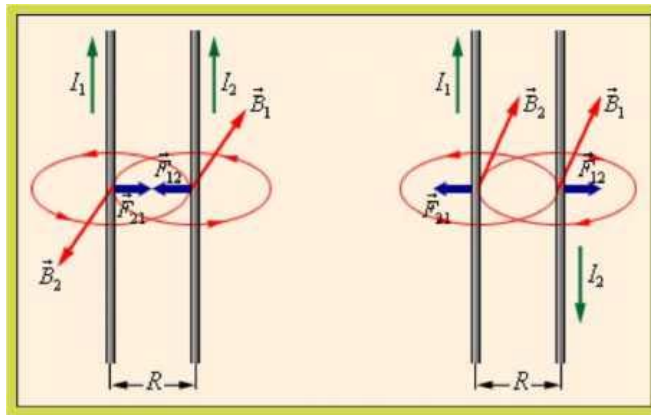
$$F_{2,1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} \Delta \ell.$$

Поскольку величины токов одинаковы, то для сил взаимодействия справедливо соотношение

$$\vec{F}_{1,2} + \vec{F}_{2,1} = 0,$$

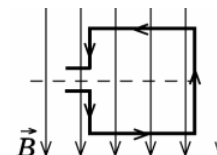
9. Сила взаимодействия двух прямолинейных бесконечно длинных параллельных проводников, на их протяженности  $\Delta l$  пропорциональна произведению величин этих токов и обратно пропорциональна расстоянию между проводниками.

10. Токи, текущие в одном направлении обеспечивают притяжение проводников, а в обратном направлении – отталкивание.



**A5.** В однородном магнитном поле в плоскости его силовых линий находится рамка, по которой идет ток (рис.). Сила, действующая на нижнюю сторону рамки, направлена

- 1) вниз
- 2) вверх
- 3) из плоскости листа на нас  $\odot$
- 4) в плоскость листа от нас  $\otimes$



### Решение

1. Раскрытую ладонь левой руки нужно расположить так, чтобы вектор магнитной индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца совпадали в направлении тока, тогда большой отставленный палец покажет направление силы Ампера, в данном случае вектор силы будет перпендикулярен плоскости рисунка и направлен в сторону от наблюдателя.

**A6.** На проводник, расположенный в однородном магнитном поле под углом  $30^\circ$  к направлению линий магнитной индукции, действует сила  $F$ . Если увеличить этот угол в 3 раза, то на проводник будет действовать сила, равная

- 1) 0
- 2)  $\frac{F}{2}$
- 3)  $2F$
- 4)  $3F$

### Решение

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= IB\ell \sin 30^\circ; \\ F_2 &= IB\ell \sin 90^\circ; \end{aligned} \right\} \Rightarrow F_2 = 2F_1;$$

**A7.** Участок проводника длиной 20 см находится в магнитном поле индукцией 50 мТл. Сила электрического тока, идущего по проводнику, равна 5 А. Какое перемещение совершит проводник в направлении действия силы Ампера, если работа этой силы равна 0,005 Дж? Проводник расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции.

- 1) 0,0001 м
- 2) 0,1 м
- 3) 0,01 м
- 4) 10 м

### Решение

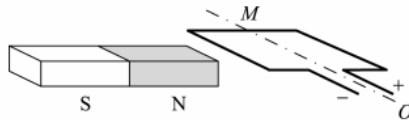
1. Сила Ампера, действующая на проводник в магнитном поле:

$$F_A = IB\ell;$$

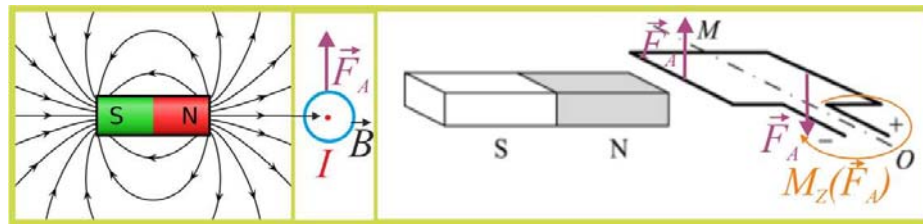
2. Работа силы Ампера на перемещении  $r$ :

$$F_A r = A = IB\ell r; \Rightarrow r = \frac{A}{IB\ell} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,2} = 0,1\text{м};$$

**С1.** Рамку с постоянным током удерживают неподвижно в поле полосового магнита (см. рисунок). Полярность подключения источника тока к выводам рамки показана на рисунке. Как будет двигаться рамка на неподвижной оси  $MO$ , если рамку не удерживать? Ответ поясните, указав, какие физические закономерности вы использовали для объяснения. Считать, что рамка испытывает небольшое сопротивление движению со стороны воздуха.



### Решение



1. На рамку действует пара сил Ампера, которая стремится повернуть рамку по часовой стрелке, до того пока правая сторона рамки не окажется в нижнем положении.

### Сила Лоренца

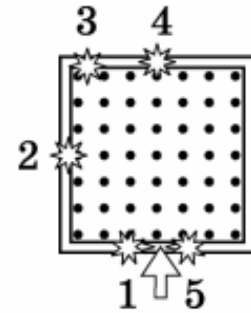
**А8.** Какая формула соответствует выражению для модуля силы Лоренца?

- 1)  $F = qE$
- 2)  $F = qvB\sin\alpha$
- 3)  $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1q_2}{r^2}$
- 4)  $F = IB\ell\sin\alpha$

### Решение

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}); \quad |\vec{F}_L| = qvB\sin(\vec{v}; \vec{B});$$

**A9.** В камере прибора создано магнитное поле, направленное так, как показано на рисунке (перпендикулярно плоскости рисунка к нам). В прибор влетают с одинаковыми скоростями разные частицы, являющиеся продуктами различных ядерных реакций (электроны  ${}^0_{-1}e$ , позитроны  ${}^0_{+1}e$ , протоны  ${}^1_1p$ , нейтроны  ${}^1_0n$ ,  $\alpha$ -частицы  ${}^4_2He$  и  $\gamma$ -кванты). Позитрон попадает на экран в точке



- 1) 1
- 2) 2
- 3) 5
- 4) 4

**Решение**

1. По правилу определения направления силы Лоренца (правило левой руки) положительно заряженная частица будет отклоняться вправо, т.е. вероятнее всего позитрон попадёт в точку 5.

---

**A10.** Два первоначально покоящихся электрона ускоряются в электрическом поле: первый в поле с разностью потенциалов  $U$ , второй —  $4U$ . Ускорившиеся электроны попадают в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны скорости движения электронов. Отношение радиусов кривизны траекторий первого и второго электронов в магнитном поле равно

- 1)  $\frac{1}{4}$
- 2)  $\frac{1}{2}$
- 3)  $\frac{\sqrt{2}}{2}$
- 4)  $\sqrt{2}$

**Решение**

1. Из условия нахождения электрона на криволинейной траектории:

$$\left. \begin{aligned} \frac{mv^2}{R} = evB; \Rightarrow R = \frac{mv}{eB}; \Rightarrow \left. \begin{aligned} R_1 &= \frac{mv_1}{eB}; \\ R_2 &= \frac{mv_2}{eB}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{v_1}{v_2}; \end{aligned}$$

2. Отношение скоростей электронов:

$$\left. \begin{aligned} \frac{mv^2}{2} = eU; \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}; \Rightarrow \left. \begin{aligned} v_1 &= \sqrt{\frac{2eU}{m}}; \\ v_2 &= \sqrt{\frac{2e4U}{m}}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{1}{2}; \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{2}; \end{aligned}$$


---

**B2.** Электрон движется по окружности в однородном магнитном поле перпендикулярно силовым линиям поля. Индукция магнитного поля нарастает, и через некоторое время электрон движется по другой орбите. Как при этом будут меняться следующие физические величины: сила, действующая на электрон со стороны поля; радиус этой орбиты?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения.

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



### Решение

1. Сила Лоренца:

$$F_L = evB \sin 90^\circ; \quad \sin 90^\circ = 1; \quad B \uparrow \Rightarrow F_L \uparrow;$$

2. Радиус круговой орбиты электрона:

$$\frac{mv^2}{R} = evB; \quad \Rightarrow \quad R = \frac{mv}{eB}; \quad \Rightarrow \quad B \uparrow \Rightarrow R \downarrow;$$

Сила, действующая на электрон со стороны поля	Радиус орбиты
<b>1</b>	<b>2</b>

**С2.** С какой скоростью вылетает  $\alpha$ -частица из радиоактивного ядра, если она, попадая в однородное магнитное поле индукцией  $B = 2$  Тл перпендикулярно его силовым линиям, движется по дуге окружности радиусом  $r = 1$  м ( $\alpha$ -частица — ядро атома гелия, молярная масса гелия  $M = 0,004$  кг/моль)?

### Решение

$$q_\alpha v B = a_n = \frac{mv^2}{r}; \quad m = \frac{\mu}{N_A}; \quad \Rightarrow \quad q_\alpha v B = \frac{\mu v}{r N_A}; \quad q_\alpha = 2e; \quad \Rightarrow \quad v = \frac{2eBrN_A}{\mu};$$

$$v \approx \frac{3,2 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 6 \cdot 10^{23}}{4 \cdot 10^{-3}} \approx 9,6 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

**С3.** В кинескопе телевизора разность потенциалов между катодом и анодом  $U = 64$  кВ. Отклонение электронного луча при горизонтальной развертке осуществляется магнитным полем, создаваемым двумя катушками. Ширина области, в которой электроны пролетают через магнитное поле, равна  $d = 5$  см. Какова индукция отклоняющего магнитного поля при значении угла отклонения электронного луча  $\alpha = 30^\circ$ ? Заряд электрона  $e$ , масса  $m$ .

### Решение

1. Скорость электрона после разгона электрическим полем:

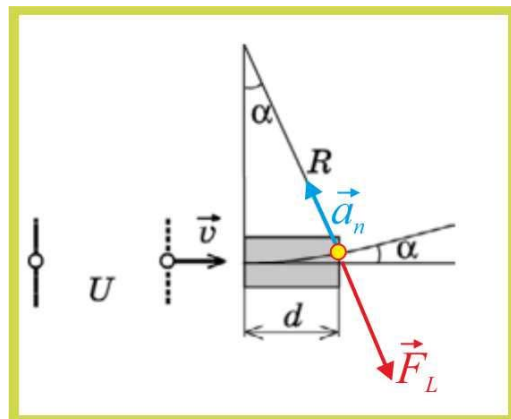
$$eU = \frac{mv^2}{2}; \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}};$$

2. Условие нахождения электрона на криволинейной траектории в магнитном поле

$$evB = \frac{mv^2}{r}; \quad v = \frac{eBr}{m}; \quad r = \frac{d}{\sin \alpha};$$

3. Приравняем скорости:

$$\sqrt{\frac{2eU}{m}} = \frac{eBd}{m \sin \alpha}; \quad B = \frac{\sin \alpha}{d} \sqrt{\frac{2mU}{e}} \approx 8 \text{ мТл};$$





### 3.6. Явление электромагнитной индукции

#### Магнитный поток

**A1.** Магнитный поток, пронизывающий плоское проводящее кольцо в однородном поле, **НЕЛЬЗЯ** изменить:

- 1) вытянув кольцо в овал
- 2) смяв кольцо
- 3) повернув кольцо вокруг оси, перпендикулярной плоскости кольца
- 4) повернув кольцо вокруг оси, проходящей в плоскости кольца

#### Решение

1. Представим себе плоский круглый контур площадью  $S$ , расположенный в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  произвольным образом.

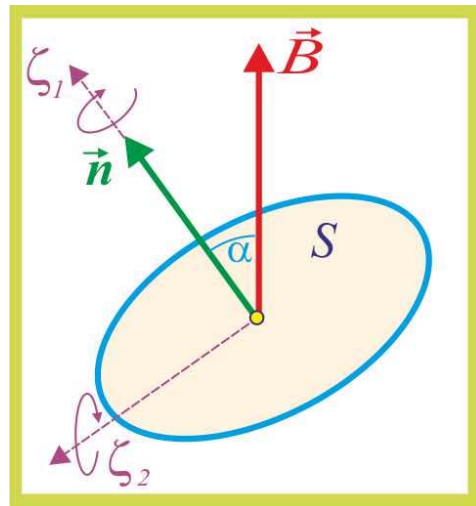
2. Магнитным потоком или потоком вектора магнитной индукции через площадку  $S$  называется величина

$$\Phi_B = BS \cos \alpha = B_n S,$$

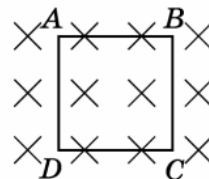
где  $\alpha$  – угол между вектором индукции и внешней нормалью к рассматриваемой площади,  $B_n$  – проекция вектора индукции на направление нормали.

**3. Магнитный поток является скалярной величиной, численно равный полному количеству линий магнитной индукции, пронизывающих данную поверхность.**

4. Так как в уравнение магнитного потока входит  $\cos \alpha$ , то поток может быть положительным, отрицательным или нулевым, в зависимости от величины угла между вектором индукции и внешней нормалью. Таким образом, величина магнитного потока не изменится, если его вращать вокруг оси  $\zeta_1$ , перпендикулярной плоскости кольца.



**A2.** Контур  $ABCD$  находится в однородном магнитном поле, линии индукции которого направлены перпендикулярно плоскости контура от наблюдателя (рис.). Магнитный поток через контур будет меняться, если контур



- 1) движется поступательно в направлении от наблюдателя
- 2) движется поступательно в направлении к наблюдателю
- 3) поворачивается вокруг стороны  $DC$
- 4) движется поступательно в плоскости рисунка

### Решение

1. Магнитный поток будет изменяться при вращении рамки вокруг стороны DC, потому что при этом изменяется угол между внешней нормалью к рамке вектором магнитной индукции.

**A3.** При увеличении в 2 раза индукции однородного магнитного поля и площади неподвижной рамки поток вектора магнитной индукции

- 1) не изменится
- 2) увеличится в 2 раза
- 3) увеличится в 4 раза
- 4) уменьшится в 4 раза

### Решение

$$\left. \begin{array}{l} \Phi_1 = BS \cos(\vec{B}; \vec{n}) \\ \Phi_2 = 2B \cdot 2S \cos(\vec{B}; \vec{n}) \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = 4;$$

**B1.** Чему равен поток вектора магнитной индукции через рамку, площадь которой равна  $0,02 \text{ м}^2$ , а плоскость расположена под углом  $60^\circ$  к вектору  $\vec{B}$ , при  $B = 0,05 \text{ Тл}$ ?

### Решение

$$\Phi_B = BS \cos(\vec{B}; \vec{n}); \quad (\vec{B}; \vec{n}) = 30^\circ; \quad \Phi_B = 0,05 \cdot 0,02 \cdot 0,87 \approx 8,66 \cdot 10^{-4} \text{ Вб};$$

## Явление электромагнитной индукции

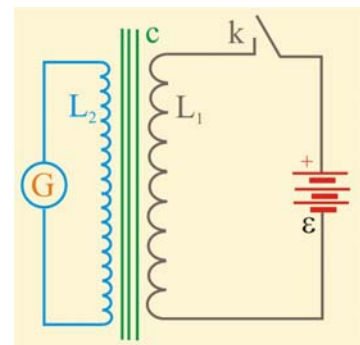
**A4.** Какой процесс объясняется явлением электромагнитной индукции?

- 1) взаимодействие двух проводов с током
- 2) возникновение электрического тока в замкнутой катушке при изменении силы тока в другой катушке, находящейся рядом с ней
- 3) отклонение магнитной стрелки вблизи проводника с током
- 4) возникновение силы, действующей на движущуюся заряженную частицу в магнитном поле

### Решение

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.

2. Первые эксперименты были просты и оригинальны. На стальной сердечник были намотаны две катушки  $L_1$  и  $L_2$ , причём первая катушка была подключена к ис-



точнику ЭДС  $\varepsilon$ . В цепь второй катушки был включён гальванометр.

3. 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.

4. Проверка обнаруженной закономерности была проверена при вдвигании и выдвигании постоянного магнита внутрь многовитковой катушки, замкнутой на гальванометр. Перемещение магнита сопровождалось возбуждением тока в катушке, который получил название **индукционного**.

5. Зафиксированные экспериментально факты индуктирования ЭДС Фарадей объяснил исходя из следующих предпосылок. Если магнитное поле изображать посредством линий индукции, то одной из характеристик будет густота линий.

6. Пусть некоторый замкнутый контур, для простоты изображения круговой, движется в магнитном поле, переходя в пространство с большей густотой линий магнитной индукции. Магнитное поле имеет вихревой характер, т.е. линии магнитной индукции замкнуты, они не имеют начал и концов.

7. Линии индукции сцеплены с контуром, поэтому пересечение этих линий должно сопровождаться пересечением плоскости контура этих линий. Если проводник находится в покое, то переменный характер должно иметь магнитное поле.

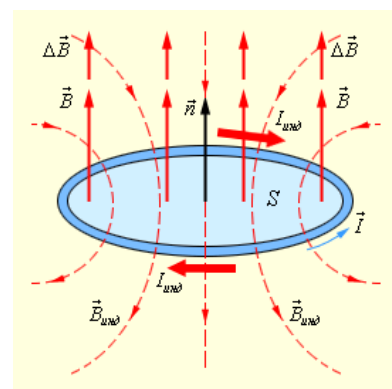
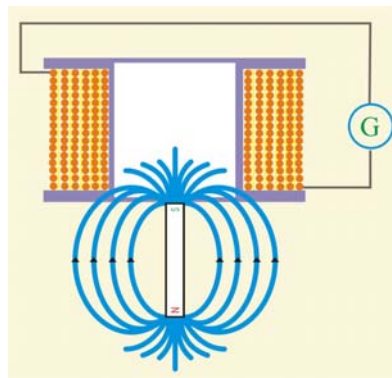
8. В этой связи Фарадей заключил, что **индукционный ток возникает в проводнике только в том случае, если проводник или какая либо его часть пересекает линии магнитной индукции**.

9. 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**.

10. 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 индуктированное 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.

11. Возникновение индукционных токов сопровождается совершением дополнительной работы внешними силами, а силы, вызванные индукционным током препятствуют движению. Приведенные выше рассуждения и экспериментальные данные были обобщены в виде закона электромагнитной индукции Майкла Фарадея

12. Пусть прямолинейный проводник длиной  $l$  перемещается с постоянной скоростью  $\vec{v}$  в однородном магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ . За время  $\Delta t$  проводник перемещается пересекая поле на площади



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

при этом изменение магнитного потока составляет

$$\Delta \Phi_B = B \Delta S.$$

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

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

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

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

### 13. Уравнение представляет собой математическое выражение закона электромагнитной индукции Майкла Фарадея.

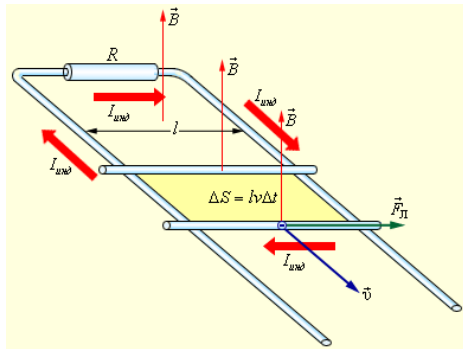
Рассмотрим причины возникновения ЭДС индукции на микроуровне с позиций классической теории электропроводности металлов. На свободные электроны, хаотически движущиеся в межкуристаллическом пространстве при наличии магнитного поля, действует сила Лоренца

$$F_L = evB.$$

Под действием силы Лоренца произойдёт перемещение зарядов, так что на концах проводника возникнет некоторая разность потенциалов  $\Delta\varphi$ . При этом возникшее электрическое поле  $\vec{E}$  будет препятствовать передвижению зарядов.

Их перемещение прекратится когда сила со стороны индуцированного электрического поля  $\vec{F}_E = e\vec{E}$  уравнивает силу Лоренца, т.е.

$$eE = evB, \Rightarrow E = vB.$$



С другой стороны  $\Delta\varphi = El$ , откуда  $E = \Delta\varphi/l$ , что позволяет записать уравнение

$$\Delta\varphi = vB\ell.$$

Представим скорость как  $v = dx/dt$

$$\Delta\varphi = \frac{dx}{dt} B\ell.$$

Сделаем в последнем уравнении ещё одну замену:  $dx \cdot \ell = dS$ , тогда

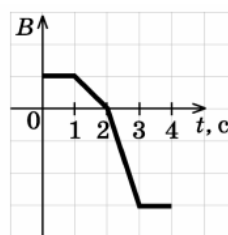
$$\Delta\varphi = \frac{BdS}{dt} = \frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Сравнивая уравнения для  $\Delta\varphi$ , можно видеть, что разность потенциалов на концах разомкнутого проводника равняется по модулю ЭДС электромагнитной индукции.

В уравнение ЭДС электромагнитной индукции не вошли конкретные механические параметры движения, потому что всё определяется только скоростью изменения магнитного потока, причём способ этого изменения не имеет принципиального значения.

**Можно перемещать контур, можно его деформировать, меняя площадь, а можно просто увеличивать или уменьшать величину магнитной индукции, во всех случаях в контуре будет возникать ЭДС индукции.**

**А5.** Неподвижный виток провода находится в магнитном поле и своими концами замкнут на амперметр. Значение магнитной индукции поля изменяется с течением времени согласно графику на рисунке. В какой промежуток времени амперметр покажет наличие электрического тока в витке?



- 1) 0—1 с и 3—4 с    2) 1—2 с    3) 2—3 с    4) 1—3 с

### Решение

1. Магнитная индукция во времени меняется в течение  $\tau = 2$  с, с первой по третью секунды, потому именно в это время  $t = 1 - 3$  с микроамперметр зафиксирует индукционные ток.

---

**А6.** Постоянный магнит за время 0,1 с вводят в катушку, соединенную длинными проводами с микроамперметром, находящимся на столе в другом конце комнаты, переходят за время 2 с к столу с микроамперметром и наблюдают за стрелкой микроамперметра. Второй раз магнит вводят за время 0,2 с, а переходят ко второму столу за время, равное 5 с. Каковы итоги наблюдений за стрелкой микроамперметра?

- 1) Оба раза показания стрелки равны нулю.  
 2) Оба раза стрелка отклонилась одинаково.  
 3) В первый раз стрелка отклонилась вдвое больше.  
 4) Во второй раз стрелка отклонилась вдвое больше.

### Решение

1. Медленно идут, пока доберутся до микроамперметра, — всё уже закончится. Эту ошибку допускал и Майкл Фарадей который долго экспериментировал с неподвижными катушками, а бросок стрелки гальванометра обнаружил только в момент выключения установки.

---

### Закон электромагнитной индукции

**А7.** Выберите правильное утверждение. ЭДС индукции, генерируемая в покоящейся рамке, зависит только от

- 1) направления вектора магнитной индукции  
 2) модуля вектора магнитной индукции  
 3) потока вектора магнитной индукции  
 4) скорости изменения потока вектора магнитной индукции

### Решение

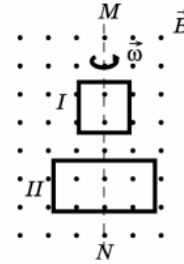
$$|\varepsilon_i| \sim \frac{d\Phi_B}{dt};$$


---

**A8.** В однородном магнитном поле вокруг оси  $MN$  с одинаковой частотой вращаются две рамки. Отношение  $A_{II} : A_I$  амплитудных значений ЭДС индукции, генерируемых в рамках II и I, равно

- 1) 1 : 2
- 2) 2 : 1
- 3) 1 : 4
- 4) 4 : 1

Ответ:



### Решение

1. Если предположить, что  $S_{II} \approx 2S_I$ , то:

$$\frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_I} = \frac{2}{1};$$

**A9.** В магнитном поле находится несколько витков провода, замкнутых на резистор. Если магнитный поток равномерно увеличивать от нуля до значения  $\Phi_0$  сначала за время  $t$ , а потом за время  $4t$ , то сила тока в резисторе во втором случае будет в

- 1) 4 раза больше
- 2) 4 раза меньше
- 3) 2 раза больше
- 4) 2 раза меньше

### Решение

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{\Delta\Phi_B}{tR}; \\ i_2 &= \frac{\Delta\Phi_B}{4tR}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{i_1}{i_2} = 4;$$

**B2.** За 5 с магнитный поток, пронизывающий проволочную рамку, увеличился от 3 до 8 Вб. Чему равно при этом значение ЭДС индукции в рамке?

### Решение

$$|\varepsilon_i| = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = \frac{8 - 3}{5} = 1 \text{ В};$$

**C1.** Плоская горизонтальная фигура площадью  $S = 0,01 \text{ м}^2$ , ограниченная проводящим контуром, имеющим сопротивление  $R = 10 \text{ Ом}$ , находится в однородном магнитном поле. Какой заряд протечет по контуру за большой промежуток времени, пока проекция магнитной индукции на вертикаль равномерно меняется с  $B_{1z} = 3 \text{ Тл}$  до  $B_{2z} = -3 \text{ Тл}$ ?

### Решение

1. ЭДС индукции в контуре:

$$|\varepsilon_i| = \frac{\Delta B}{\Delta t} S;$$

2. Сила индукционного тока в контуре и соответствующий этому току заряд:

$$i = \frac{|\varepsilon_i|}{R}; \quad |q| = i\Delta t; \quad \Rightarrow \quad |q| = \frac{1}{R} \Delta BS = \frac{6 \cdot 0,01}{10} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Кл};$$

**С2.** Медный куб с длиной ребра  $a = 0,1$  м скользит по столу с постоянной скоростью  $v = 10$  м/с, касаясь стола одной из плоских поверхностей. Вектор индукции магнитного поля  $B = 0,2$  Тл направлен вдоль поверхности стола и перпендикулярно вектору скорости куба. Найдите модуль вектора напряженности электрического поля, возникающего внутри металла, и модуль разности потенциалов между центром куба и одной из его вершин.

### Решение

1. ЭДС индукции, возникающей между плоскими поверхностями куба, отстоящими на расстоянии  $a$ :

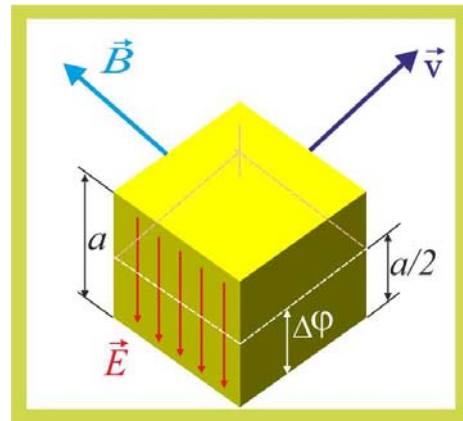
$$|\varepsilon_i| = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{Bav\Delta t}{\Delta t} = Bav;$$

2. Напряжённость электрического поля внутри металла:

$$|\vec{E}| = \frac{|\varepsilon_i|}{a} = Bv = 2 \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

3. Разность потенциалов между плоскостями, проходящими через поверхность, прилегающую к столу и центр куба:

$$\Delta\varphi = |\vec{E}|d = |\vec{E}| \frac{a}{2} = 0,1\text{В};$$



**С3.** Плоская замкнутая рамка из одного витка провода, охватывающая прямоугольник площадью  $S = 0,01$  м<sup>2</sup>, лежит на горизонтальной плоскости в однородном вертикальном магнитном поле индукцией  $B = 2$  Тл. Какой заряд протечет по рамке, если ее повернуть на  $180^\circ$  вокруг одной из ее сторон? Сопротивление рамки равно  $R = 0,1$  Ом.

### Решение

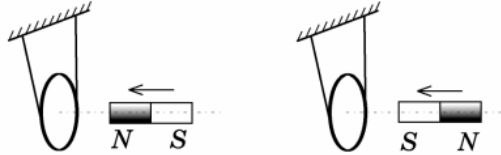
1. При повороте рамки на  $180^\circ$  магнитный поток будет иметь два максимальных по модулю значения при начальном и конечном положении, следовательно, суммарный заряд составит:

$$q = \frac{2BS}{R} = 0,4\text{Кл};$$



## Правило Ленца

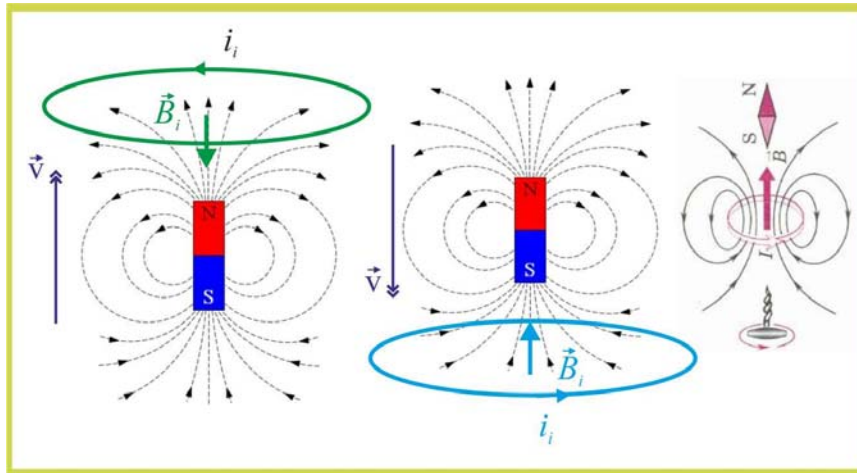
**A10.** Постоянный магнит вводят в замкнутое алюминиевое кольцо на тонком длинном подвесе (рис.). Первый раз — северным полюсом, второй раз — южным полюсом. При этом



- 1) в первом опыте кольцо притягивается к магниту, во втором — кольцо отталкивается от магнита
- 2) в первом опыте кольцо отталкивается от магнита, во втором — кольцо притягивается к магниту
- 3) в обоих опытах кольцо притягивается к магниту
- 4) в обоих опытах кольцо отталкивается от магнита

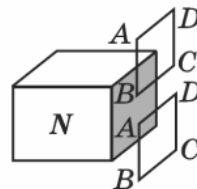
## Решение

1. Правило Ленца: индукционный ток во всех случаях направлен таким образом, что его действие противоположно действию причины, вызвавшей этот ток.



2. В этих опытах кольцо будет отклоняться от торца приближающегося магнита.

**A11.** Вблизи северного полюса магнита падает медная рамка  $ABCD$  (рис.). При прохождении верхнего и нижнего положений рамки, показанных на рисунке, индукционный ток в стороне  $AB$  рамки



- 1) равен нулю в обоих положениях
- 2) направлен вверх в обоих положениях
- 3) направлен вниз в обоих положениях
- 4) направлен вверх и вниз соответственно



### Решение

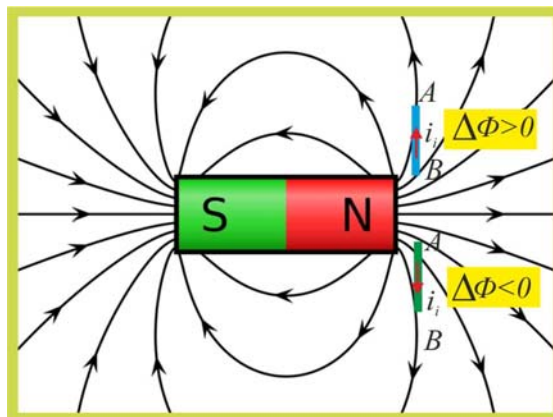
1. При прохождении рамки верхней половины торца магнита густота силовых линий будет возрастать

$$\Delta\Phi_B > 0;$$

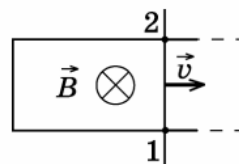
а при движении в нижней половине торца магнита густота силовых линий будет уменьшаться

$$\Delta\Phi_B < 0;$$

2. В соответствии с правилом Ленца в первом случае индукционный ток направлен вверх, а во втором случае – вниз.



**A12.** Два рельса замкнуты на конце проводником (рис., вид сверху). Другой проводник, параллельный ему и имеющий с рельсами надежный контакт в точках 1 и 2, скользит по ним с постоянной скоростью  $v$  в магнитном поле, вектор магнитной индукции которого  $\vec{B}$ . Как направлен индукционный ток на участке цепи 1—2 и каково соотношение потенциалов в точках 1 и 2?



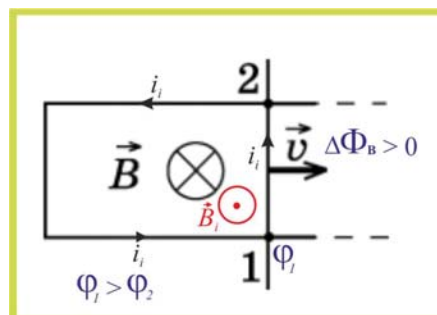
- 1) от 2 к 1,  $\varphi_2 > \varphi_1$
- 2) от 1 к 2,  $\varphi_2 > \varphi_1$
- 3) от 2 к 1,  $\varphi_1 > \varphi_2$
- 4) от 1 к 2,  $\varphi_1 > \varphi_2$

### Решение

1. При указанном направлении движения перемычки площадь контура увеличивается, растёт и магнитный поток пронизывающий его

$$\Delta\Phi_B > 0;$$

2. Вектор магнитной индукции индукционного поля контура будет направлен в сторону противоположную вектору индукции внешнего поля (правило Э. Х. Ленца), индукционный ток в этом случае ( по правилу буравчика) будет направлен против хода часовой стрелки, следовательно  $\varphi_1 > \varphi_2$ .



**A13.** Проволочное кольцо покоится в магнитном поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости кольца. В первый промежуток времени проекция вектора магнитной индукции на некоторую фиксированную ось линейно растёт от  $B_0$  до  $5B_0$ , во второй — за то же время уменьшается от  $5B_0$  до 0, затем за третий такой же промежуток времени уменьшается от 0 до  $-5B_0$ . На каких отрезках времени совпадают направления тока в кольце?

- 1) 1 и 2    2) 1 и 3    3) 2 и 3    4) на всех отрезках

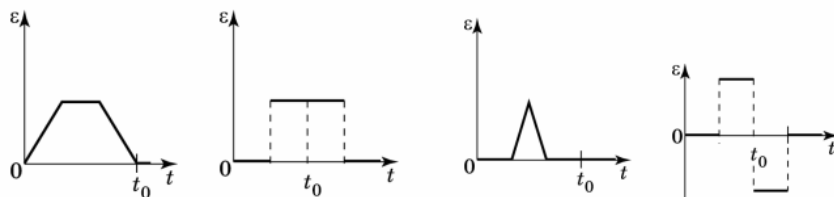
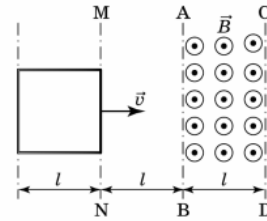
## Решение

1. В первом и третьем случаях  $\Delta\Phi_B > 0$ , поэтому и направление индукционных токов будут одинаковыми.

---

### Вихревое электрическое поле

**A14.** В некоторой области пространства, ограниченной плоскостями АВ и CD, создано однородное магнитное поле. Металлическая квадратная рамка движется с постоянной скоростью, направленной вдоль плоскости рамки и перпендикулярно линиям индукции поля. На каком из графиков правильно показана зависимость от времени ЭДС индукции в рамке, если в начальный момент времени рамка начинает пересекать плоскость MN (см. рисунок), а в момент времени  $t_0$  касается передней стороной линии CD?



## Решение

1. Поскольку площадь контура, фиксированная величина, то магнитный поток через этот контур будет возрастать при входе рамки в область, занятую стационарным магнитным полем, а при выходе рамки поток будет уменьшаться. При этом ЭДС индукции будет менять свой знак.

2. Учитывая совпадение линейного размера рамки и размеров поля, а так же постоянство скорости перемещения рамки

$$|\varepsilon_i| = B \frac{dS}{dt} = B \frac{av dt}{dt} = Bav;$$

что более справедливым делает график 4.

---

**A15.** Около полосы медной фольги с большой частотой меняют магнитное поле, вектор индукции которого направлен перпендикулярно пластине. В пластине возникает ток:

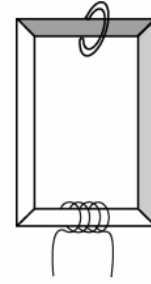
- 1) направленный вдоль полосы
- 2) направленный поперек полосы
- 3) идущий по окружности в одном направлении
- 4) идущий по окружности и периодически меняющий направление

## Решение

1. Возникнет круговой индукционный ток переменного направления.

---

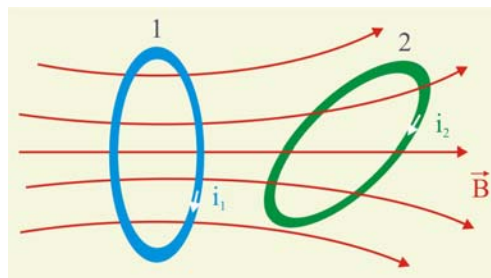
**A16.** На сердечник в виде сплошной массивной рамки из стали квадратного сечения (рис.) намотана катушка из изолированного проводника и надето кольцо. Вихревое электрическое поле при пропускании по катушке периодически меняющегося тока возникает



- 1) только вдоль стержней сердечника
- 2) только внутри стержней сердечника поперек его сечения
- 3) только в кольце по его периметру
- 4) в кольце по периметру и в сердечнике поперек его сечения

### Решение

1. По круговому контуру 1 пропускается ток  $i_1$ . Вокруг проводника возникнет магнитное поле, линии индукции будут сцеплены с этим контуром. Если в непосредственной близости расположить аналогичный контур 2, то часть магнитного потока первого контура будет сцеплено и с этим, вторым контуром, т.е. между контурами существует магнитная связь. Магнитный поток первого контура можно выразить через его индуктивность и величину протекающего тока



$$\Phi_{m(1,2)} = L_{1,2}i_1,$$

где  $L_{1,2}$  – взаимная индуктивность контуров. Если во втором контуре протекает ток величиной  $i_2$ , то для него можно записать аналогичное уравнение

$$\Phi_{m(2,1)} = L_{2,1}i_2.$$

2. Логично предположить, что взаимные индуктивности в рассматриваемом случае будут одинаковыми

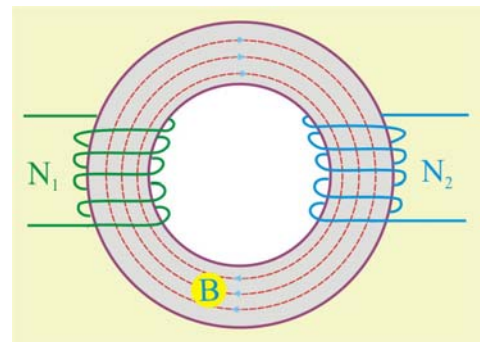
$$L_{1,2} = L_{2,1}.$$

3. Магнитная связь контуров проявляется при изменении величины тока в одном из контуров в виде возникновения ЭДС индукции

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_2 &= -\frac{d\Phi_{1,2}}{dt} = -L_{1,2} \frac{di_1}{dt}, \\ \varepsilon_1 &= -\frac{d\Phi_{2,1}}{dt} = -L_{1,2} \frac{di_2}{dt}, \end{aligned} \right\}$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – ЭДС индукции, возникающие соответственно в первом и втором контуре. Взаимная индукция определяется формой и размерами контуров, их взаимным пространственным расположением и характеристиками окружающей среды.

4. Рассмотрим две катушки с количеством витков  $N_1$  и  $N_2$ , намотанных на стальной сердечник с магнитной проницаемостью  $\mu$ . В данном случае можно считать, что магнитное поле постоянной напряжённости сосредоточено внутри тороидального сердечника. Если по первой обмотке протекает ток величиной  $I_1$ , то в соответствии с законом о циркуляции вектора  $\vec{H}$



$$\oint \vec{H} d\vec{\ell} = \sum_{k=1}^{k=n} I_k,$$

можно для рассматриваемого случая записать

$$H\ell = N_1 I_1,$$

где  $\ell$  – Длина сердечника. Поперечное сечение сердечника  $S$  пронизывает магнитный поток величины

$$\Phi_m = BS = \mu\mu_0 HS.$$

5. Полный магнитный поток, сцепленный со второй катушкой, определится на основе уравнения (7.46) следующим образом

$$\Psi_2 = \frac{S}{\ell} \mu\mu_0 N_1 N_2 I_1.$$

6. Взаимная индуктивность катушек определится как

$$L_{2,1} = \frac{S}{\ell} \mu\mu_0 N_1 N_2.$$

7. В данном случае  $L_{1,2} \neq L_{2,1}$ , дело в том, что магнитная проницаемость сердечника зависит от напряжённости поля, т.е. от величины тока. Если  $N_1 \neq N_2$  ток одной и той же величины, пропускаемый вначале по первой обмотке, а затем по второй обмотке создаст в сердечнике поле различной напряжённости, и величина  $\mu$  будет различной.

8. Применительно к задаче вихревое электрическое поле возникает как в кольце, так и в сердечнике, правильный ответ – 4.

**A17.** Квадратная рамка со стороной 0,5 м лежит на столе. Однородное магнитное поле ( $B = 0,4$  Тл), направленное перпендикулярно плоскости рамки, равномерно убывает до нуля в течение 0,1 с. Какую работу совершает за это время вихревое электрическое поле в рамке, если ее сопротивление равно 0,5 Ом?

- 1) 0,01 Дж    2) 0,05 Дж    3) 0,1 Дж    4) 0,2 Дж

#### Решение

$$|\varepsilon_i| = \frac{\Delta B}{\Delta t} a^2 = 1В; \quad i_1 = \frac{|\varepsilon_i|}{R} = 2А; \quad P = |\varepsilon_i| \cdot i_1 = 2Вт; \quad A_E = P\Delta t = 0,2Дж;$$

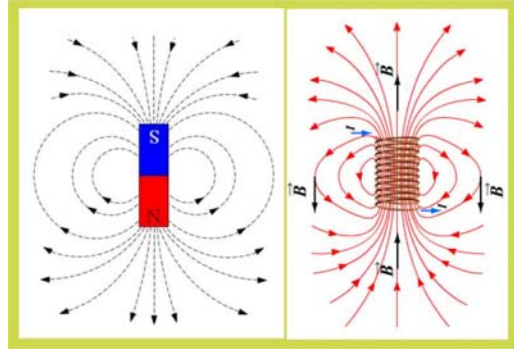
### Электродвигатели. Электрогенераторы. Электроизмерительные приборы

**C4.** Стержневой магнит, падая вертикально, пролетает сквозь закрепленную в штативе катушку, концы которой замкнуты. При этом время его полета оказывается больше, чем при падении с такой же высоты без катушки. Объясните явления, приводящие к такому эффекту. Изменится ли время падения, если пускать магнит другим полюсом вниз?

### Решение

1. При приближении и удалении магнита к неподвижной катушке в последней возникает за счёт изменяющегося (возрастание и убывание в зависимости, приближается магнит или удаляется) магнитного потока возникает ЭДС индукции.

2. ЭДС индукции сопровождается возникновением индукционного тока, магнитное поле которого направлено (в соответствии с правилом Ленца) противоположно полю магнита, что и создаёт эффект торможения.



**С5.** Электродвигатель постоянного тока подключен к источнику тока и поднимает груз массой 1 г со скоростью 4 см/с. Напряжение на клеммах двигателя 4 В, сила тока 1 мА. Какое количество теплоты выделится в обмотке двигателя за 5 с? Ускорение свободного падения считать равным  $10 \text{ м/с}^2$ .

### Решение

1. Механическая работа производимая электродвигателем за время  $\tau$ :

$$A = \Delta P = mgh = mgv\tau = 10^{-3} \cdot 10 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \cdot 5 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

2. Электрическая энергия, выделившаяся в электродвигателе за это же время:

$$W = IU\tau = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 5 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж};$$

3. Электрическая энергия, выделившаяся в виде теплоты:

$$Q = W - A = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} = 18 \text{ мДж};$$

**В3.** При вращении в однородном магнитном поле квадратной рамки вокруг оси, проходящей через середины двух сторон, в ней генерируется синусоидальное напряжение. Как изменятся характеристики синусоидального напряжения при увеличении скорости вращения рамки: амплитуда и частота?

Для каждой величины определите соответствующий характер изменения:

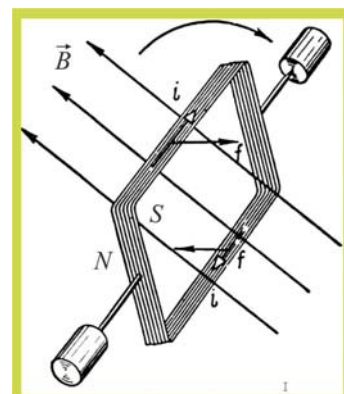
- 1) увеличится
- 2) уменьшится
- 3) не изменится

### Решение

$$\varepsilon_{\max} \approx NB \frac{\Delta S}{\Delta t}; \quad \frac{\Delta S}{\Delta t} \uparrow \Rightarrow \varepsilon_{\max} \uparrow;$$

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

Амплитуда	Частота
<b>1</b>	<b>1</b>

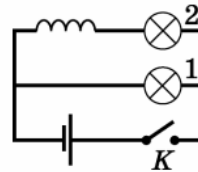


### 3.7. Электромагнитные колебания и волны

#### Самоиндукция. Индуктивность. Энергия магнитного поля

**A1.** Лампочка 2 в схеме, изображенной на рисунке, при замыкании ключа  $K$  загорается на 0,5 с позже лампочки 1 потому, что

- 1) ток по длинному проводу катушки доходит до нее позже
- 2) лампочка 2 находится дальше от ключа  $K$
- 3) в катушке возникает вихревое электрическое поле, препятствующее нарастанию тока в ней
- 4) электроны тормозятся на изогнутых участках цепи



#### Решение

1. При подаче питания на схему, в цепи величина тока будет увеличиваться от нулевого значения до номинала в течение некоторого промежутка времени вследствие явления самоиндукции. Возникающие экстратоки в соответствии с правилом Ленца всегда направлены противоположно, т.е. они препятствуют вызывающей их причине. Они препятствуют увеличению тока в цепи.

2. При подключении коммутатора в положение 1 экстратоки станут препятствовать увеличению тока в цепи. Будем считать для простоты анализа, что включённое в цепь сопротивление  $R$  характеризует сопротивление цепи, внутреннее сопротивление источника и активное сопротивление катушки  $L$ . Закон Ома в этом случае примет вид

$$\varepsilon + \varepsilon_{si} = iR,$$

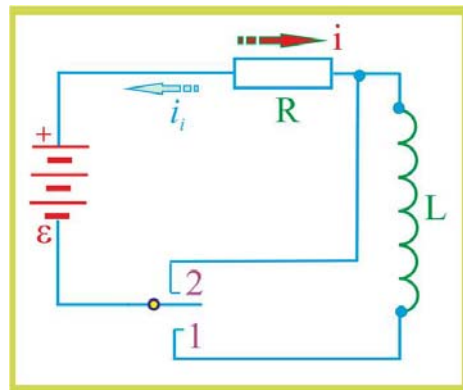
где  $\varepsilon$  – ЭДС источника,  $\varepsilon_{si}$  – ЭДС самоиндукции,  $i$  – мгновенное значение величины тока, который является функцией времени. Подставим в закон Ома уравнение ЭДС самоиндукции

$$L \frac{di}{dt} + iR = \varepsilon.$$

3. 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, получим

$$\text{const} = \frac{\varepsilon}{R}.$$

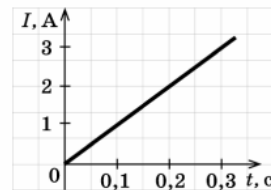
6. Решение уравнения для тока примет вид

$$i(t) = \frac{\varepsilon}{R} \left( 1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right).$$

**A2.** Если сила тока в катушке индуктивностью 0,5 Гн изменяется с течением времени, как показано на графике, то в катушке возникает ЭДС самоиндукции, равная

- 1) 0,05 В
- 2) 0,5В
- 3) 5 В
- 4) 0,45 В

Ответ:



**Решение**

$$\varepsilon_{\text{си}} = -L \frac{di}{dt}; \quad |\varepsilon_{\text{си}}| = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 0,5 \frac{2,5}{0,25} = 5\text{В};$$

**A3.** Как изменился магнитный поток через катушку индуктивности, если при увеличении силы тока в катушке энергия магнитного поля катушки увеличилась в 4 раза?

- 1) увеличился в 4 раза
- 2) уменьшился в 4 раза
- 3) увеличился в 2 раза
- 4) остался прежним

**Решение**

$$W = \frac{Li^2}{2}; \quad \Phi_B = \mu_0 \mu \frac{iNS}{\ell}; \quad W \sim i^2; \quad \Rightarrow \frac{\Phi_2}{\Phi_1} = 2;$$

**A4.** В проводнике индуктивностью 50 мГн сила тока в течение 0,1 с равномерно возрастает с 5 А до некоторого конечного значения. При этом в проводнике возбуждается ЭДС самоиндукции, равная 5 В. Определите конечное значение силы тока в проводнике.

- 1) 5 А
- 2) 10 А
- 3) 15 А
- 4) 20 А

### Решение

$$|\varepsilon_{si}| = L \frac{\Delta i}{\Delta t}; \quad \Delta i = \frac{\varepsilon_{si} \Delta t}{L}; \quad \Delta i = i_{\max} - i_{\min}; \quad i_{\max} = \Delta i + i_{\min} = \frac{\varepsilon_{si} \Delta t}{L} + i_{\min} = 15 \text{ A};$$

---

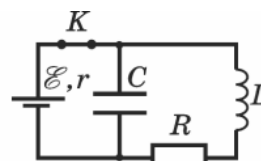
- C1.** В катушке сила тока равномерно увеличивается со скоростью 3 А/с. При этом в ней возникает ЭДС самоиндукции 15 В. Чему равна энергия магнитного поля катушки при силе тока в ней 4 А?

### Решение

$$|\varepsilon_{si}| = L\xi; \quad \xi = \frac{\Delta i}{\Delta t}; \quad L = \frac{|\varepsilon_{si}|}{\xi}; \quad W = \frac{Li^2}{2} = \frac{\varepsilon_{si}}{2\xi} i^2 = \frac{15}{6} 16 = 40 \text{ Дж};$$

---

- C2.** В электрической цепи, состоящей из источника с ЭДС равной 5 В, ключа  $K$ , конденсатора емкостью 0,1 мкФ, катушки индуктивностью 0,2 Гн и резистора сопротивлением 1 кОм, идет ток (рис.). Какое количество теплоты выделится на резисторе после размыкания ключа, если  $r = 1 \text{ Ом}$ .



### Решение

1. Сила постоянного тока в цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r};$$

2. Напряжение на обкладках конденсатора:

$$U = IR = \frac{\varepsilon R}{R + r};$$

3. После размыкания ключа возникнут электромагнитные колебания в RLC-контуре энергия которых в идеале и перейдет в тепло (исключая потери)

$$Q \approx W = \frac{LI^2}{2} + \frac{CU^2}{2} = \frac{L\varepsilon^2}{2(R+r)^2} + \frac{C\varepsilon^2 R^2}{2(R+r)^2} = \frac{\varepsilon^2}{2(R+r)^2} (L + CR^2);$$

$$Q \approx \frac{25}{2000} (0,2 + 10^{-7} \cdot 10^6) \approx 3,75 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

---

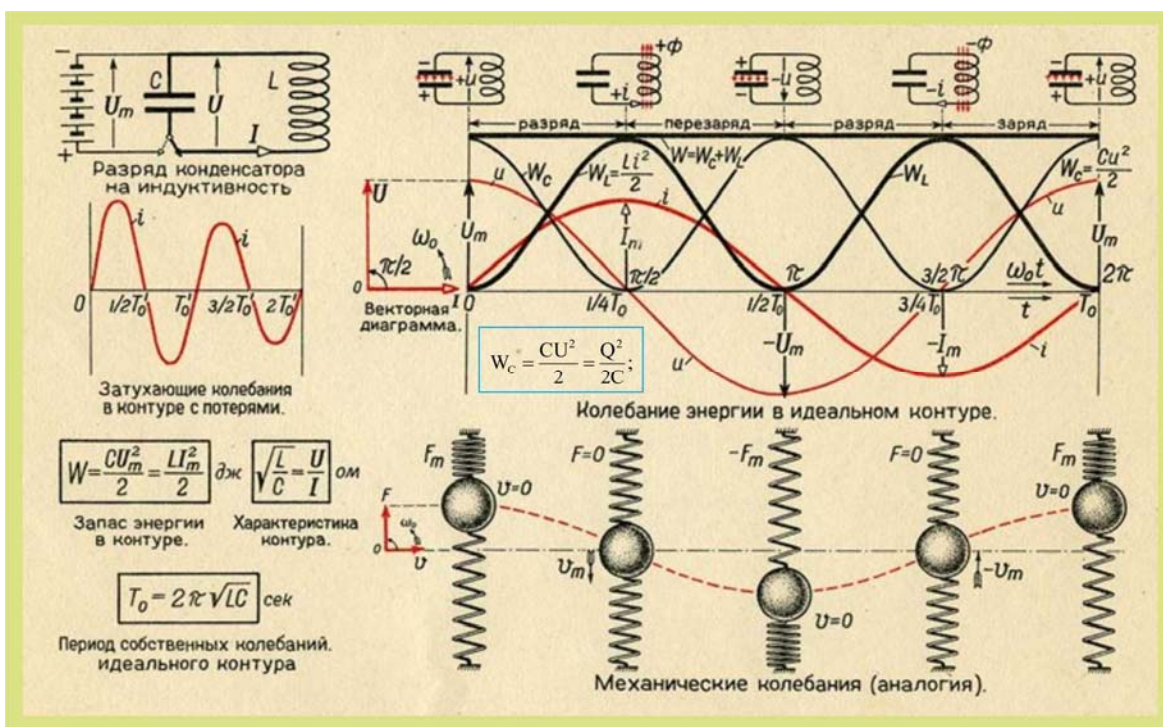
### Свободные электромагнитные колебания. Колебательный контур

- A5.** Заряженный конденсатор замыкают на катушку. Активное сопротивление проводов и катушки ничтожно. Заряд на положительно заряженной пластине конденсатора

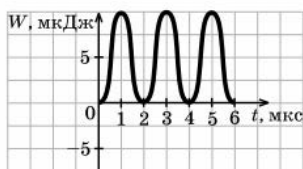
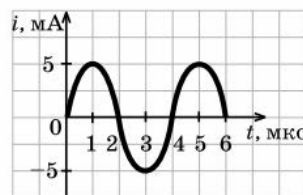
- 1) монотонно возрастет до некоторого максимального значения
- 2) монотонно спадет до нуля
- 3) будет колебаться от начального значения до нуля и обратно
- 4) будет колебаться от начального значения до противоположного, периодически меняя знак



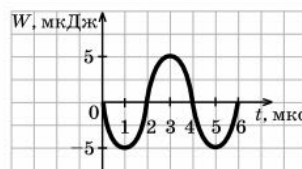
## Решение



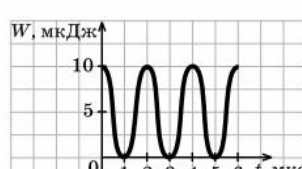
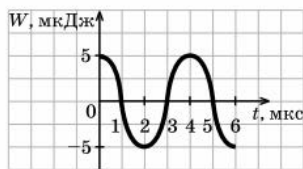
**А6.** На рисунке приведен график зависимости силы тока от времени в колебательном контуре. На каком из графиков правильно показан процесс изменения энергии магнитного поля катушки?



1)



2)



## Решение

1. Энергия свободных незатухающих собственных колебаний изменяется по гармоническому закону с двойной частотой, по сравнению с частотой изменения силы тока в катушке и напряжения на конденсаторе, кроме того:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}; \Rightarrow W_m \sim i_m^2; \Rightarrow \text{график 1.}$$

**A7.** Как изменится период собственных колебаний контура, если его индуктивность увеличить в 20 раз, а емкость уменьшить в 5 раз?

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) уменьшится в 2 раза
- 3) увеличится в 4 раза
- 4) уменьшится в 4 раза

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2\pi\sqrt{LC}; \\ T_2 &= 2\pi\sqrt{20L\frac{C}{5}}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = 2;$$


---

**B1.** Амплитудное значение заряда на конденсаторе равно 2,0 мкКл. Чему равно значение заряда на конденсаторе через 1/6 часть периода колебаний после достижения этого значения?

**Решение**

$$q(t) = q_m \cos \omega t = q_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right);$$

$$t = \frac{T}{6}; \Rightarrow q = q_m \cos\left(\frac{2\pi}{T}\frac{T}{6}\right) = q_m \cos\frac{\pi}{3} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл};$$


---

**C3.** В таблице показано, как изменялся заряд конденсатора в колебательном контуре с течением времени.

$t, 10^{-6} \text{ с}$	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

Вычислите индуктивность катушки контура, если емкость конденсатора равна 100 пФ.

**Решение**

1. По заданной таблице определяется период колебаний:

$$T = 8 \cdot 10^{-6} \text{ с};$$

2. Индуктивность катушки вычисляется по уравнению Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}; \Rightarrow L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} \approx \frac{64 \cdot 10^{-12}}{40 \cdot 10^{-10}} \approx 16 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$


---

**C4.** В колебательном контуре, состоящем из конденсатора, катушки индуктивностью 0,01 Гн и ключа, после замыкания ключа возникают электромагнитные колебания, причем максимальная сила тока в катушке составляет 4 А. Чему равно максимальное значение энергии электрического поля в конденсаторе в ходе колебаний?

**Решение**

$$W_{\max(L)} = W_{\max(C)} = \frac{Li_{\max}^2}{2} = \frac{10^{-2} \cdot 16}{2} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ Дж} \equiv 80 \text{ мДж};$$


---

- C5. В идеальном колебательном контуре амплитуда колебаний силы тока в катушке индуктивности равна  $I_1 = 10$  мА, а амплитуда колебаний заряда конденсатора равна  $q_1 = 5$  нКл. В момент времени  $t$  заряд конденсатора  $q = 3$  нКл. Найдите силу тока в катушке в этот момент.

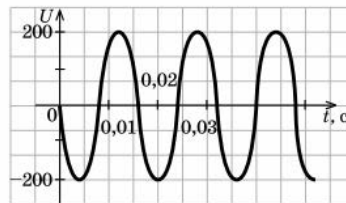
**Решение**

1. На основании закона сохранения энергии для идеального колебательного контура:

$$\left. \begin{aligned} \frac{q^2}{2C} + \frac{Li^2}{2} &= \frac{Li_m^2}{2}; \\ \frac{q_m}{2C} &= \frac{Li_m^2}{2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} i^2 &= i_m^2 - \frac{q^2}{LC}; \\ LC &= \frac{q_m^2}{i_m^2}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow i = i_m \sqrt{1 - \frac{q^2}{q_m^2}} = 10^{-2} \sqrt{1 - \frac{9}{25}} \approx 8 \text{ мА};$$

**Переменный ток. Действующие значения силы тока и напряжения. Конденсатор и катушка в цепи переменного тока. Электрический резонанс**

- A8. На рисунке показан график изменения напряжения на выходе генератора с течением времени. Чему равен период колебаний напряжения?



- 1) 50 с                      2) 0,017 с                      3) 60 с                      4) 0,02 с

**Решение**

1. Вероятнее всего  $T < 0,02\text{с} \approx 0,017\text{ с}$ .

- A9. По участку цепи сопротивлением  $R$  идет переменный ток, меняющийся по гармоническому закону. В некоторый момент времени действующее значение напряжения на этом участке цепи уменьшили в 2 раза, а его сопротивление уменьшили в 4 раза. При этом мощность тока
- 1) уменьшилась в 4 раза
  - 2) уменьшилась в 8 раз
  - 3) не изменилась
  - 4) увеличилась в 2 раза

**Решение**

$$P_1 = I_1 U_1 = \frac{U_1^2}{R_1} = I_1^2 R_1; \quad P_2 = 2I_1 \frac{U_1}{2}; \quad \Rightarrow \quad P_1 = P_2;$$

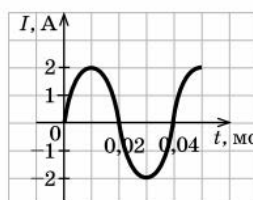
- A10.** Сила тока через резистор меняется по закону  $I = 36\sin 128t$ . Действующее значение силы тока в цепи равно
- 1) 36 А      2) 72 А      3) 128 А      4) 25 А

**Решение**

$$i = \frac{i_m}{\sqrt{2}} = \frac{36}{1,41} = 25,5\text{А};$$

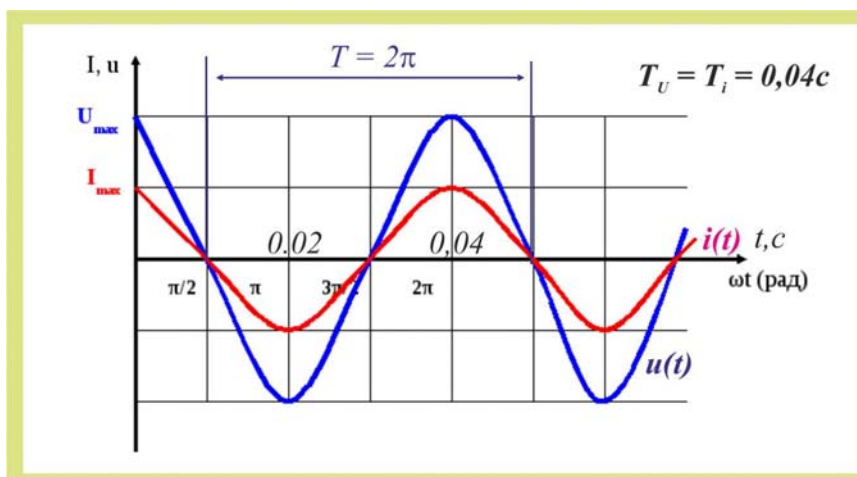
**Производство, передача и потребление электрической энергии. Трансформатор**

- A11.** Если сила тока в электрической лампочке, питаемой от генератора переменного тока, меняется с течением времени согласно графику на рисунке, то период колебаний напряжения на клеммах лампы равен



- 1) 0,01 мс      2) 0,02 мс      3) 0,04 мс      4) 25 мс

**Решение**



- A12.** Напряжение в домашней сети меняется по закону  $U = U_0 \cos \omega t$ . Сопротивление утюга равно  $R$ . Мощность утюга при этом равна

- 1)  $\frac{U_0^2}{R}$       2)  $\frac{U_0^2}{2R}$       3)  $\frac{U_0^2}{\omega R}$       4)  $\frac{U_0^2}{4R}$

**Решение**

$$u = \frac{U_0}{\sqrt{2}}; \quad P = \frac{u^2}{R} = \frac{U_0^2}{2R};$$

**A13.** Напряжение на концах первичной обмотки трансформатора 110 В, сила тока в ней 0,1 А. Напряжение на концах вторичной обмотки 220 В, сила тока в ней 0,04 А. Чему равен КПД трансформатора?

- 1) 120%      2) 93%      3) 80%      4) 67%

**Решение**

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{u_2 i_2}{u_1 i_1} = \frac{220 \cdot 0,04}{110 \cdot 0,1} = 0,8 \text{ (80\%);}$$

**С6.** Генератор переменного тока с ЭДС  $A(t) = A_0 \cos \omega t$  ( $A_0 = 304\text{В}$ ) и пренебрежимо малым внутренним сопротивлением соединен проводами поперечного сечения  $S = 1 \text{ см}^2$  с потребителем сопротивлением  $R = 5 \text{ Ом}$ , находящимся на расстоянии  $L = 1 \text{ км}$ . Какая средняя мощность  $P$  передается потребителю по линии электропередачи, сделанной из проводника с удельным сопротивлением  $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

**Решение**

1. Сопротивление линии передачи электроэнергии:

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 = \frac{2\rho L}{S} = \frac{2 \cdot 2,8 \cdot 10^{-8} \cdot 10^3}{10^{-4}} = 0,56 \text{ Ом};$$

2. Полное сопротивление внешней цепи:

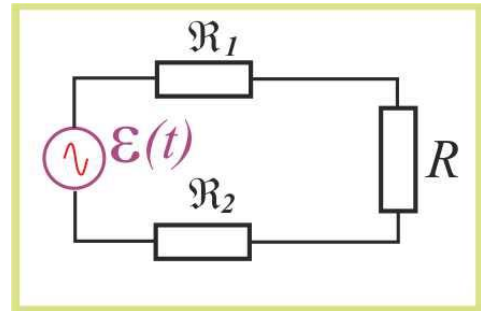
$$R_\Sigma = \mathfrak{R} + R = 5,56 \text{ Ом};$$

3. Эффективное значение напряжения:

$$u = \frac{u_0}{\sqrt{2}} = \frac{304}{1,41} = 216 \text{ В};$$

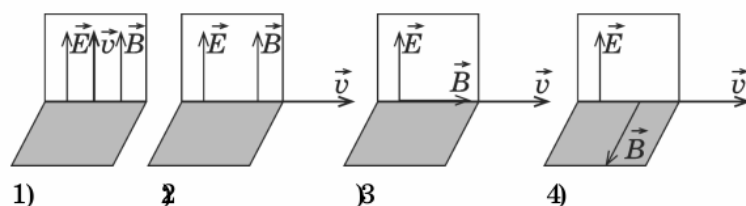
4. Средняя мощность:

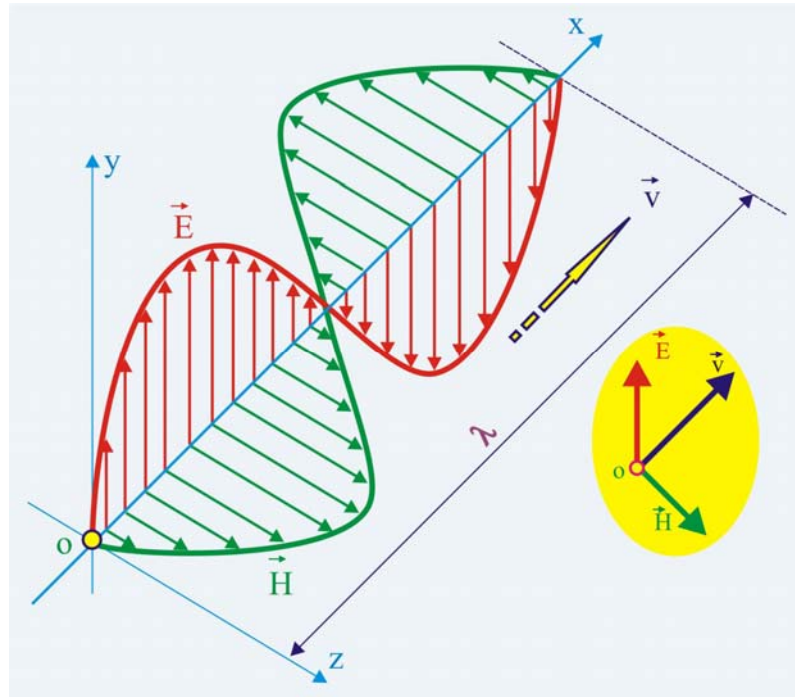
$$\langle P \rangle = \frac{u^2}{R_\Sigma} = 8,36 \cdot 10^3 \text{ Вт};$$



### Электромагнитное поле

**A14.** На каком из рисунков правильно показано взаимное направление векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$ , индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и скорости распространения в вакууме электромагнитной волны  $\vec{v}$ ?





**A15.** Согласно теории Максвелла электромагнитные волны излучаются

- 1) только при равноускоренном движении по прямой
- 2) только при гармонических колебаниях заряженных частиц
- 3) только при равномерном движении заряженных частиц по окружности
- 4) при любом движении заряженных частиц с ускорением

### Решение

Все факты проявления электрических и магнитных полей можно обобщить в виде нескольких известных утверждений.

**1. 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

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV,$$

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  $\Phi_E$  через произвольную замкнутую поверхность  $S$ , ограничивающая объём  $V$ .

**2. Утверждение 2.** В природе до настоящего времени не обнаружены изолированные магнитные заряды (монополи). Математическим содержанием этого утвер-

ждения так же является теорема Остроградского – Гаусса, правая часть которой равна нулю

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0.$$

**3. 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 нулевой циркуляцией поля по произвольному контуру

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = 0.$$

**4. 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.

5. Дополним эти утверждения выражением для комплексной силы Лоренца, которая действует на движущиеся заряды со стороны электрических и магнитных полей:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B}).$$

6. Все четыре условия, по сути, были сформулированы без учёта особенностей, возникающих при явлении электромагнитной индукции. А суть вот в чём.

7. 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.

9. 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 ранее утверждения дополнить законом электромагнитной индукции Майкла Фарадея

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

10. Подставим далее значение ЭДС индукции из уравнения в утверждение №3

$$\oint_{\ell} \vec{E} d\vec{\ell} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

11. Последнее уравнение, содержащее закон электромагнитной индукции, даёт основание уточнить третье утверждение следующим образом.



12. **Утверждение 3\***. Изменение магнитного поля приводит к возникновению вихревого электрического поля.

13. Ещё одним примером необычного проявления свойства электрического поля является колебательный контур. Поставив переключатель в положение 1, зарядим конденсатор, а затем переключатель K перебросим в положение 2. Конденсатор начнёт разряжаться через сопротивление R и индуктивность L.

14. В образованном замкнутом контуре возникнет индукционный ток, причём конденсатор станет неоднократно перезаряжаться. В этом случае электрическая энергия, запасаемая в конденсаторе, будет неоднократно преобразовываться в энергию магнитного поля катушки

$$\frac{CU^2}{2} \Leftrightarrow \frac{LI^2}{2};$$

15. Этот колебательный процесс, по большому счёту противоречит нашему четвёртому утверждению. Конденсатор, в простейшем варианте, представляющий собой две проводящие пластины, разделённые диэлектриком, не предрасположен проводить электрический ток, тем не менее, ток всё же протекает, обеспечивая его перезарядку.

15. Впервые подобным процессом заинтересовался Максвелл, который задался целью модифицировать уравнение четвёртого утверждения применительно к рассматриваемым случаям.

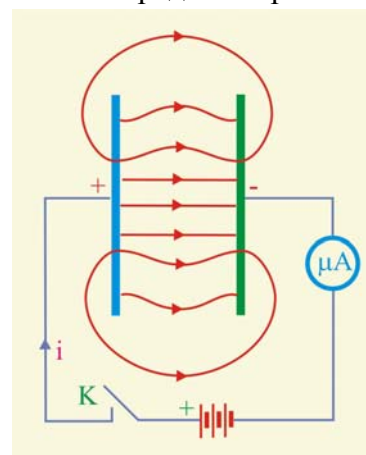
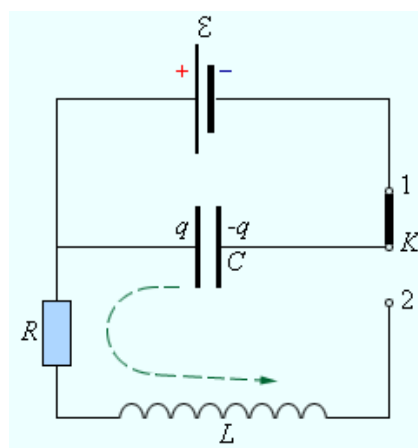
16. Было экспериментально установлено и теоретически обосновано, что всякое переменное магнитное поле вызывает вихревое электрическое поле. Анализируя эти факты, Максвелл пришёл к выводу, что **возможен и обратный процесс, т.е. всякое изменение электрического поля должно вызывать появление вихревого магнитного поля**.

17. Это было сильное утверждение, потому что оно при дальнейшем экстраполировании приводило к довольно необычным выводам. Магнитное поле, как известно, является основным признаком всякого тока, из этого следовало, что переменное электрическое поле должно приводить к возникновению некоего тока.

18. Максвелл отождествил переменное электрическое поле с понятием «ток смещения», который не является следствием движения носителей зарядов. Термин во многом с исторической подоплёкой, потому что в некоторых средах, например в вакууме, вообще никаких зарядов нет, смещаться нечему, а вот в диэлектрических средах эффект смещения зарядов имеет место.

19. Разберёмся с этим необычным током на примере зарядки обычного конденсатора. Включим в цепь конденсатора и источника внешней ЭДС микроамперметр с центральным начальным положением стрелки для регистрации возникающего тока.

20. Контур, по большому счёту разомкнут, потому что содержит конденсатор, постоянный ток, как известно, не пропускающий. При длительном подключении батареи к конденсатору микроамперметр тока не фиксирует, а в первые моменты включения конденса-





тор заряжается, в металлических проводниках возникает зарядный ток.

21. Если полюса батареи поменять местами, то конденсатор перезарядится и в процессе перезарядки снова возникнет ток, но уже обратного направления. Если конденсатор подключить к сети переменного тока с частотой  $f = 50 \text{ с}^{-1}$ , а микроамперметр заменить лапой накаливания, то она станет вспыхивать с частотой, равной  $\nu = 100 \text{ с}^{-1}$ , что человеческий глаз различить не сможет, и будет казаться, что лампочка просто горит.

22. Эти и подобные им эксперименты показывают, что переменный электрический ток, т.е. переменное электрическое поле, может прекрасно существовать и в незамкнутых контурах. Как совершенно гениально предположил Максвелл, токи проводимости в проводящем разомкнутом контуре замыкаются токами смещения в диэлектрике, при этом электрическое поле в конденсаторе в произвольный момент времени создаёт магнитное поле, такое же, как если бы пространство между обкладками было проводящим. Возникающее магнитное поле такое же, как и в проводнике, т.е. такое же, как и в замкнутом контуре.

23. Уравнения Максвелла записываются обычно в двух формах: **интегральной и дифференциальной форме.**

24. **Интегральные уравнения** выражают соотношения для проведенных мысленно в магнитном поле неподвижных контуров и поверхностей.

25. **Дифференциальная форма уравнений** устанавливает взаимосвязь между характеристиками поля и плотностями электрических зарядов и токов в каждой точке пространства занятого полем.

Уравнения в интегральной форме были, по сути, сформулированы выше, путём констатации экспериментально и теоретически очевидных фактов:

$$\left. \begin{aligned} \text{(I)} \quad \oint_S \vec{E} d\vec{S} &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV; \\ \text{(II)} \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0; \\ \text{(III)} \quad \oint_\ell \vec{E} d\vec{\ell} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \\ \text{(IV)} \quad \oint_\ell \vec{B} d\vec{\ell} &= \mu_0 \oint_S \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \end{aligned} \right\}$$

26. **Первое уравнение** системы не является абсолютно новым, в его основу положена теорема Остроградского – Гаусса для электрических полей в средах. Электрическое поле в диэлектрической среде, создаётся зарядами двух типов: **свободными и связанными.**

Связанными называются заряды, входящие в состав структурных элементов вещества диэлектрика, т.е. молекул, атомов и ионов. Свободными считаются заряды, способные перемещаться под действием электрического поля на макроскопические расстояния, а так же избыточные заряды, сообщённые диэлектрику извне.

Электрическое поле в диэлектрике, таким образом, представляет собой суперпозицию двух полей, генерируемых связанными и свободными зарядами. Теорема Остроградского – Гаусса в этом случае записывается следующим образом

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} (Q^{\text{своб}} + Q^{\text{связ}}).$$

Уместно напомнить, в этой связи, что уравнение теоремы учитывает только заряды, содержащиеся внутри мысленно проведенного контура, так сказать, только охваченные заряды. Поле связанных зарядов зависит от степени поляризации диэлектрика, т.е. от суммарного дипольного момента всех молекул, заключённых в рассматриваемом объёме  $\Delta V$ , ограниченном поверхностью  $S$

$$\vec{P}_m = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^{i=N} \vec{p}_{mi}.$$

Напряжённость поля, создаваемого связанными зарядами, определится как

$$\vec{E}^{\text{связ}} = -\frac{1}{\epsilon_0} \oint_S \vec{p}_m d\vec{S}.$$

Знак минус характеризует факт уменьшения потенциальной энергии диполя при его повороте в электрическом поле. Уравнение позволяет выразить величину связанного заряда следующим образом

$$Q^{\text{связ}} = -\oint_S \vec{p}_m d\vec{S}.$$

Перепишем теорему Остроградского – Гаусса следующим образом

$$\oint_S \vec{E} d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon} \left( Q^{\text{своб}} - \oint_S \vec{p}_m d\vec{S} \right),$$

или

$$Q^{\text{своб}} = \epsilon_0 \oint_S \vec{E} d\vec{s} + \oint_S \vec{p}_m d\vec{S}.$$

Поскольку интегралы берутся по одной и той же замкнутой поверхности, то их можно преобразовать к виду

$$Q^{\text{своб}} = \oint_S (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{p}_m) d\vec{S}.$$

Уравнение можно привести к обычной форме записи теоремы Остроградского – Гаусса, если ввести обозначение

$$(\epsilon_0 \vec{E} + \vec{p}_m) = \vec{D},$$

тогда

$$\oint_S \vec{D} d\vec{s} = Q^{\text{своб}}.$$

Таким образом, мы снова пришли к понятию вектора электрического смещения или, как его иногда называют, вектором электрической индукции. Уравнение определяет поток вектора смещения, пронизывающий поверхность  $S$ , т.е.

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{s} = Q^{\text{своб}}.$$

Если поверхность  $S$  неподвижна и недеформируемая, то изменение потока будет сопряжено с зависимостью вектора электрического смещения от времени. Продифференцируем по времени уравнение

$$\frac{dQ^{\text{своб}}}{dt} = \frac{d\Phi_D}{dt} = \frac{d}{dt} \oint_S \vec{D} d\vec{s},$$

или

$$\frac{dQ^{\text{своб}}}{dt} = \oint_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{s}.$$

Размерность левой части последнего уравнения [Кл/с], т.е. соответствует размерности силы тока. Естественно в этой связи предположить, что величина  $[\partial \vec{D} / \partial t]$  должна иметь размерность  $[A/m^2]$ , т.е. плотности тока  $j$ . Другими словами, можно обоснованно ввести понятие плотности тока смещения.

**27. Плотность тока смещения**, таким образом, равна скорости изменения вектора смещения. Отметим, что подынтегральное выражение содержит в общем случае две переменных величины  $t$  и  $S$ , но в данном конкретном случае, площадь исследуемого контура полагается неизменной, что позволяет ток смещения представить в виде:

$$i_c = \int_S \vec{j}_c d\vec{s} = \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} d\vec{s}.$$

Для чего же потребовалась Максвеллу гипотеза о токе смещения? В своей работе «Динамическая теория электромагнитного поля» он написал: «... В диэлектрике, находящемся под действием электродвижущей силы, мы можем представлять, что электричество в каждой молекуле так смещено, что одна сторона молекулы делается положительно наэлектризованной, а другая – отрицательно наэлектризованной, однако электричество остаётся полностью связанным с молекулами и не переходит от одной молекулы к другой. Эффект этого воздействия на всю массу диэлектрика выражается в общем смещении электричества в определённом направлении. Это смещение не вполне равноценно току, потому что когда оно достигает определённой степени, то остаётся неизменным, но оно есть начало тока и его изменения образуют токи в положительном или отрицательном направлениях, сообразно тому, уменьшается или увеличивается смещение ...».

Введя понятие тока смещения, Максвелл совершенно не тривиально подошёл к понятию замкнутости электрических цепей. Как отмечалось ранее, возникновение постоянного электрического тока возможно только в замкнутой цепи, потому, что там понятие тока связывается с переносом зарядов. Иное дело в цепях переменного тока, по Максвеллу замкнутость цепи совсем не обязательна.

Так, например, при зарядке и разрядке конденсатора через сопротивление электрический ток силой  $i$  протекает по соединительным проводам, при этом вокруг них создаётся магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , причём оно не заканчивается на обкладках конденсатора, образуя своеобразную оболочку.

В то время, как электрическое поле распадается, провода окружены кольцевыми линиями магнитной индукции. Соединительная цепь будет иметь магнитную «шубу», доходящую до пластин. Пространство между пластинами заполнено всегда диэлектрическим веществом, которое, как известно ток не проводит в виду малого ко-

личества свободных зарядов, способных к перемещению под действием электрического поля.

Джеймс Клерк Максвелл взял на себя смелость утверждать, что «магнитная оболочка» не имеет концов, а образует полое кольцо из кольцевых линий магнитной индукции.

Ток смещения представляет собой, по сути, изменяющееся во времени электрическое поле в любой среде, вплоть до пустого пространства. В максвелловском представлении в природе существуют только замкнутые токи, причём это могут быть как токи проводимости, так и токи смещения. Электрические токи, исходя, из представлений Максвелла, не могут иметь начала и конца. **Там где заканчивается ток проводимости, неминуемо должен начинаться ток смещения.**

**28. Второе уравнение.** Максвелл записал это уравнение как факт отсутствия в природе уединённых магнитных зарядов. **Магнитный поток через замкнутую неподвижную поверхность, мысленно проведенную в электромагнитном поле равен нулю.**

**29. Третье уравнение.** Максвелл этим уравнением обобщил закон электромагнитной индукции Майкла Фарадея применительно к замкнутому неподвижному проводящему контуру, находящемуся в переменном магнитном поле. Проанализировав известное уравнение

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s},$$

Максвелл обратил внимание на то, что в него не входят параметры материала проводника. Он решил распространить это уравнение на любой контур, мысленно проведенный в переменном магнитном поле. Одной из особенностей третьего уравнения является то, что электрическое поле, в отличие от кулоновского полагается не потенциальным. Циркуляция вектора  $\vec{E}$  зависит от способа проведения контура в поле.

Главный же физический смысл третьего уравнения заключается в том, что оно устанавливает взаимосвязь переменного магнитного поля с индуцированным электрическим полем, причём наличие проводников совершенно не обязательно. Применительно к первому уравнению обычно приводят следующую смысловую формулировку: **«Циркуляция вектора напряжённости электрического поля по произвольному контуру, мысленно проведенному в электромагнитном поле, равна, взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока через поверхность, натянутую на этот контур».**

**30. Четвёртое уравнение.** С учётом тока смещения Максвелл записал закон полного тока следующим образом:

$$\int_L \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0} d\vec{\ell} = \oint_L \vec{H} d\vec{\ell} = i_{\text{макро}} + i_c,$$

где  $i_{\text{макро}}$  – макро ток, вызванный перемещением свободных носителей заряда под действием электрического поля,  $i_c$  – ток смещения, некоторые свойства которого оговорены выше. Это уравнение показывает, что циркуляция вектора напряжённости магнитного поля  $\vec{H}$  по произвольному неподвижному контуру  $L$ , мысленно прове-

денному в электрическом поле, равна алгебраической сумме макро тока и тока смещения сквозь поверхность, причём

$$i_{\text{макро}} = \oint_S \vec{j} d\vec{S},$$

где  $\vec{j}$  – плотность тока проводимости.

Дифференциальная форма уравнений представляет собой систему четырёх дифференциальных уравнений в частных производных

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \\ \text{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \\ \text{div} \vec{D} &= \rho; \\ \text{div} \vec{B} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

31. Уравнения Максвелла сыграли огромную роль не только в электродинамике, но и во всей современной физике. К окончанию XIX века уже была установлена непрерывность пространства, было ясно, что в каждой точке любая физическая величина имеет вполне определённое значение, причём переход от точки к точке носит непрерывный и плавный характер. Понятие эфира постепенно вытеснялся прагматичным понятием поля.

Образом поля в различных отделах физики, в принципе, начали пользоваться со второй половины XIX века. Например, при объяснении явлений электрического и магнитного свойства. Настоятельная необходимость введения понятия поля появилась после того, как датский физик Ханс Кристиан Эрстед (1777 – 1851 гг.), можно сказать, случайно в 1820 г., поместил магнитную стрелку около проводника с током и обнаружил, к своему великому удивлению, что стрелка перестала реагировать на магнитное поле Земли, а «переключилась» на проводник.

В этом же году Ампер разработал теорию связи электричества и магнетизма, используя понятие поля. В 1840 г. Майкл Фарадей в своих лекциях говорит о попытках «открыть прямую связь между светом и электричеством».

Такую связь Фарадей установил, наблюдая на опыте вращение плоскости поляризации в магнитном поле. Фарадей (1791 – 1867 гг.) на основе экспериментальных исследований сформулировал идеи поля как новой формы материи, введя понятие силовых линий.

Эстафету формирования законов электромагнитного поля продолжил Джеймс Клерк Максвелл, записав идеи Фарадея в виде записанных выше уравнений, которые были доведены до современной формы записи Герцем на основе векторного анализа Хевисайда.

32. Революционное значение уравнений Максвелла состояло в том, что **они предсказывали существование электромагнитных волн**, которые были обнаружены опытным путём в 1888 г. Генрихом Герцем. Анализируя уравнения, Максвелл обнаружил, что взаимосвязанные изменения электрических и магнитных полей, в конечном счете, должны были приводить к появлению волны в абсолютно пустом пространстве.

Эта идея была настолько нетрадиционна, что противников у неё было гораздо больше, нежели сторонников, как среди учёных академического толка, так и среди инженеров. Дело в том, что понятие волн в то время обязательно связывалось с наличием среды, в которой волны распространяются.

Житейские наблюдения говорили о том же: волны на поверхности жидкости, волны на полях, засеянных злаками, упругие волны в газах, жидкостях и твёрдых телах и т.д.

Когда же со средой возникали трудности и недоразумения её, как отмечено выше, заполняли разного рода эфирами, обладающими свойствами, необходимыми для существования данной теории. А волна в пустом пространстве, помимо всех прочих странностей, ещё и не должна затухать, тут явно пахло нарушением законов сохранения в механическом их толковании.

Работая над своими уравнениями Максвелл не подозревал, что в Королевском научном обществе хранится с 1832 г. запечатанный конверт, который велено открыть и сделать достоянием общества через 106 лет (!?).

Текст послания, составленного загадочным Майклом Фарадеем и зачитанным только в 1938 г. потряс до возможного предела сдержанных английских учёных и их зарубежных коллег.

Фарадей завещал: « Я пришёл к заключению, что на распространение магнитного воздействия требуется время, которое, очевидно, окажется весьма незначительным. Я полагаю, что электромагнитная индукция распространяется точно таким же образом. Я полагаю, что распространение магнитных сил от магнитного полюса похоже на колебания взволнованной водной поверхности. По аналогии я считаю возможным применить теорию колебаний к распространению электромагнитной индукции. В настоящее время, насколько это мне известно, никто из учёных не имеет подобных взглядов».

Конверт был запечатан Майклом Фарадеем, когда Максвеллу был всего год от роду. Сейчас трудно представить себе причины, по которым Фарадей не опубликовал столь гениальную догадку.

Толи боязнь быть не понятым, а возможно осознание преждевременности своей идеи. Ясно одно, со сроками созревания научной мысли Фарадей явно просчитался. Потребовалось существенно менее 100 лет, чтобы удалось увидеть в электричестве и магнетизме объединяющее начало, и, как следствие этого, появление особого рода волн.

33. Несмотря на то, что мы постоянно упоминали Максвелла, приведенная нами форма записи уравнений принадлежит не ему. Практически все учебники повторяют уравнения, записанные Генрихом Герцем. Максвелл все свои теоретические взгляды на электромагнитные явления обобщил в виде системы из **двадцати уравнений**, а Герц, в процессе их осмысления, **воспользовавшись неопубликованными работами Оливера Хевисайда**, нашёл способ свести теорию всего к четырём уравнениям.

С позиций профессионалов, формально, полученная система уравнений достаточно проста, однако в процессе её применения открывался всё больший и больший их внутренний смысл.

Генрих Герц, которому выпала историческая роль доказательства справедливости уравнений в одной из своих публикаций записал:

«Нельзя изучать эту удивительную теорию, не испытывая по временам такого чувства, будто математические формулы живут собственной жизнью, обладают собственным разумом – кажется, что эти формулы умнее нас, умнее даже самого автора, как будто они дают нам больше, чем в своё время в них было заложено».

Работая в команде Гельмгольца, Герц имел все возможности проявить себя. К великому сожалению, судьба определила Герцу светлую голову и никудышнее здоровье. Он родился, как в прочем и многие гении (Ньютон, Кеплер, Декарт и др.) очень слабым. Врачи без оптимизма оценивали его дальнейшие перспективы пребы-

вания на этом Свете. Болезни буквально преследовали Герца от самого рождения и до безвременной кончины в возрасте всего 37 лет.

Чтобы окончательно убедить себя в невозможности распространяться какой бы то ни было субстанции в пустоте, Гельмгольц поручает Генриху Герцу спланировать и провести серию экспериментов. Начинающему двадцатилетнему учёному с ещё не окрепшими научными взглядами и представлениями была поручена миссия экспериментального опровержения юного выскочки.

Авторитет Гельмгольца был настолько велик, что у Герца по началу и в мыслях даже не было объективно во всём разобраться. Однако, чем больше Герц ставил эксперименты, тем радикальнее опровергалась теория дального действия и находила подтверждение там, где совпадала с представлениями англичанина.

А признавать универсальность максвелловской теории ой как не хотелось. Во-первых, потому что теория родом из Англии, которая, как известно для немцев совсем даже не указ. Во-вторых, если признать правоту Максвелла, то нужно было, мягко говоря, переоценить значимость великих немецких электродинамиков, таких как Нейман, Вебер, сам Геймгольц и др.

Высказывание Герца о «самостоятельной жизни уравнений» начали подтверждаться сразу после первых попыток их применения. О самостоятельности уравнений говорили немногие учёные, в основном их поминали совсем недобрыми словами, ввиду непонимания многих, связанных с ними нюансов. Один из основных нюансов, который был особо неудобоварим авторитетами, был связан с наличием в уравнениях неких «загадочных констант» с неясным физическим смыслом.

Беспокойство классиков было оправданным. Дело в том, что появление в уравнениях физики новых постоянных величин, как правило, носило революционно-фундаментальный характер. Так произошло и на этот раз, константа оказалась более чем фундаментальной.

34. Выяснилось, что **в уравнениях «зашифрована» скорость света**, которая к моменту появления уравнений была уже измерена экспериментально. Дело в том, что комбинация достаточно хорошо известных постоянных величин, входящих в систему уравнений

$$\sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \cong \sqrt{\frac{1}{9 \cdot 10^{-12} \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} \cong 2,99874109 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

совпала с высокой степенью точности с измеренным значением скорости света. Совпадение было настолько разительным, что его трудно было отнести к случайному, если даже очень сильно захотеть.

До этого даже мысли ни у кого из учёных не возникало, что световые волны имеют какое-то отношение к электродинамике. Оптика, хоть и волновая, никак не связывалась с электромагнитными забавами Максвелла Герца и Хевисайда.

Проведя анализ уравнений с позиций закона сохранения энергии, Максвелл пришёл к совершенно фантастическому по тем временам выводу. **Уравнения не удовлетворяли закону сохранения энергии.**

Процесс преобразования переменного электрического поля в магнитное поле должен сопровождаться образованием волн, которые и уносят часть энергии, первоначально запасённой в рассматриваемом контуре.

Мало того, по Максвеллу, для распространения этих волновых процессов совершенно не требовалась среда, **они могли путешествовать в пустоте.**

Сейчас можно только представить, как эта идея подействовала на учёный мир, полагавший, кстати, не без оснований, что распространения волны обязательно должно быть связано с теми или иными деформациями среды. В этом плане уравнения Максвелла были просто опасны для всего, что было написано по электродина-

мике до того, так как они не оставляли камня на камне в электродинамических замках, построенных многими поколениями талантливых учёных.

Но очевидно именно в этом и состоит суть прогресса, когда на смену, казалось бы, безупречным причёсанным временем теориям, приходят, кажущиеся по началу несуразными, новые воззрения и напористо занимают своё место под Солнцем. Так случилось и с системой уравнений Максвелла.

Максвелл, по остроумному выражению Роберта Милликена: «...Облек плебейски обнажённые представления Фарадея в аристократические одежды математики».

Два человека, следуя идеям и принципам Максвелла, после его смерти пытались разработать такую же всеобъемлющую теорию гравитационного поля. Этими людьми были Хевисайд (1850 – 1920 гг.) и Эйнштейн (1879 – 1955 гг.), они пытались объединить электромагнетизм и гравитацию в виде единой теории поля.

Как известно, Эйнштейну это не удалось. По отношению к загадочному и малоизвестному широким массам Хевисайду такого, с полной уверенностью, сказать нельзя.

После его смерти в 1925 г. рукописи, посвящённые этой задаче, были таинственным образом похищены и не обнаружены до настоящего времени.

**Но, в оставшихся неопубликованных рукописях, была найдена знаменитая формула  $E = mc^2$ , которая была записана за 15 лет до Эйнштейна!?**

Значит, размышлял-таки Хевисайд о возможности непосредственного преобразования массы в энергию, о взаимосвязи инертных и электромагнитных свойств Мира в материальном и полевом состоянии. Очень странная история, однако!

35. Из уравнений Максвелла – Герца – Хевисайда следовало, что всякий ускоренно движущийся заряд излучает электромагнитную волну с интенсивностью:

$$\mathfrak{I} \approx \frac{2}{3} q^2 a^2;$$

**A16.** Параллельно какой координатной оси распространяется плоская электромагнитная волна, если в некоторый момент времени в точке с координатами  $(x, y, z)$  напряженность электрического поля  $\vec{E} = (0, 0, E)$ , а индукция магнитного поля  $\vec{B} = (0, B, 0)$ ?

- 1) параллельно оси  $X$
- 2) параллельно оси  $Y$
- 3) параллельно оси  $Z$
- 4) такая волна невозможна

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial z^2} &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}. \end{aligned} \right\} \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}$$

$$\left. \begin{aligned} E(x, t) &= E_m \sin(\omega t - kx); \\ H(x, t) &= H_m \sin(\omega t - kx). \end{aligned} \right\} \Rightarrow \vec{v} \parallel \vec{i}; \quad \vec{v} \parallel (0x);$$



**A17.** В первых экспериментах по изучению распространения электромагнитных волн в воздухе были измерены длина волны  $\lambda = 50$  см и частота излучения  $\nu = 500$  МГц. На основе этих неточных данных было получено значение скорости света в воздухе, равное примерно

- 1) 100 000 км/с
- 2) 200 000 км/с
- 3) 250 000 км/с
- 4) 300 000 км/с

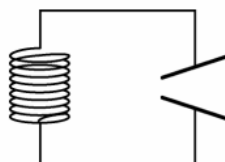
**Решение**

$$v = \lambda \nu = 0,5 \cdot 5 \cdot 10^8 = 2,5 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}} \equiv 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{км}}{\text{с}};$$

### Электромагнитные волны

**A19.** Известно, что при раздвигании пластин конденсатора в колебательном контуре (рис.) происходит излучение электромагнитных волн. В ходе излучения амплитудное значение напряжения на конденсаторе

- 1) возрастает
- 2) не изменяется
- 3) убывает
- 4) ответ зависит от начального заряда на конденсаторе



**Решение**

1. В системе уравнений Максвелла – Герца – Хевисайда

$$\left. \begin{aligned} \text{(I)} \quad \oint_S \vec{E} d\vec{S} &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV; \\ \text{(II)} \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0; \\ \text{(III)} \quad \oint_\ell \vec{E} d\vec{\ell} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \\ \text{(IV)} \quad \oint_\ell \vec{B} d\vec{\ell} &= \mu_0 \oint_S \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \end{aligned} \right\}$$

не выполняется закон сохранения энергии, дело в том, что при преобразовании электрической энергии в магнитную и наоборот часть энергии уносится в пространство образующимися электромагнитными волнами, поэтому напряжение на конденсаторе уменьшается.

**A20.** Колебания электрического поля в электромагнитной волне описываются уравнением  $E = 10 \cos\left(10^{-6}t + \frac{\pi}{2}\right)$ .

Определите частоту колебаний.

- 1)  $10^{-6} \text{ с}^{-1}$
- 2)  $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$
- 3)  $\frac{\pi}{2} \text{ с}^{-1}$
- 4)  $10 \text{ с}^{-1}$

**Решение**

$$E(t) = E_m \cos(\omega t + \varphi_0); \quad \omega = 10^{-6} \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega = 2\pi\nu; \quad \nu = \frac{\omega}{2\pi} \approx 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1};$$

---

**A21.** Скорость распространения гамма-излучения в вакууме

- 1) равна  $3 \cdot 10^8$  м/с
- 2) равна  $3 \cdot 10^2$  м/с
- 3) зависит от частоты
- 4) зависит от энергии

**Решение**

1. Гамма-излучение представляет собой электромагнитные волны длиной менее одного ангстрема, поэтому скорость распространения  $\gamma$ -излучения равна скорости света  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с.

---

**Свойства электромагнитных волн**

**A22.** При прохождении электромагнитных волн в воздухе происходят колебания

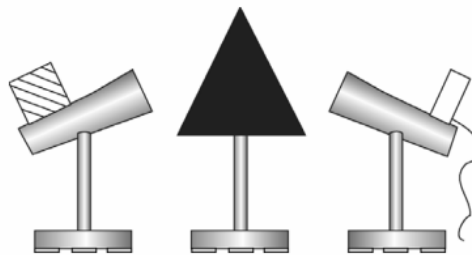
- 1) молекул воздуха
- 2) плотности воздуха
- 3) напряженности электрического и индукции магнитного полей
- 4) концентрации кислорода

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} E(x, t) &= E_m \sin(\omega t - kx); \\ B(x, t) &= B_m \sin(\omega t - kx). \end{aligned} \right\}$$

---

**A23.** На рисунке показан опыт, в котором изучаются свойства электромагнитных волн.



Этот эксперимент показывает, что они могут

- 1) отражаться
- 2) преломляться
- 3) интерферировать
- 4) огибать препятствия

**Решение**

1. Подобный эксперимент с асфальтовыми призмами проводил Генрих Герц, который обнаружил, что электромагнитные волны преломляются призмой.

---

**A24.** Если направление распространения электромагнитной волны данной частоты при переходе из воздуха в диэлектрик меняется так, что угол падения и угол преломления связаны соотношением  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n$ , то длина волны в диэлектрике

- 1) будет такой же, как в воздухе
- 2) будет в  $n$  раз больше
- 3) будет в  $n$  раз меньше
- 4) может быть больше и меньше вне связи со значением  $n$

**Решение**

$$n = \frac{v_0}{v} = \frac{v\lambda_0}{v\lambda}; \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n};$$

**A25.** Длина электромагнитной волны в воздухе равна  $6 \cdot 10^{-7}$  м. Чему равна частота колебаний вектора напряженности электрического поля в этой волне?

- 1)  $10^{14}$  Гц
- 2)  $5 \cdot 10^{14}$  Гц
- 3)  $10^{13}$  Гц
- 4)  $5 \cdot 10^{13}$  Гц

**Решение**

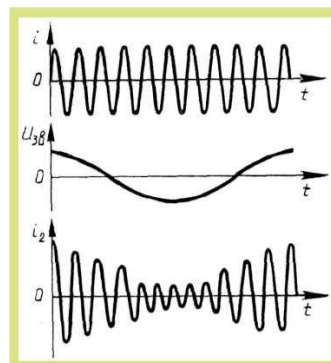
$$c = v\lambda; \quad \Rightarrow \quad v = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{-7}} = 5 \cdot 10^{14} \text{ Гц};$$

### Принципы радиосвязи и телевидения

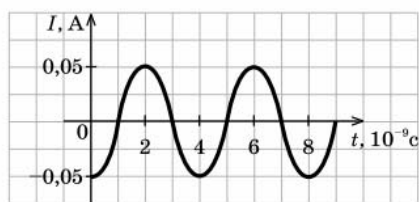
**A26.** Амплитудная модуляция высокочастотных электромагнитных колебаний в радиопередатчике используется для

- 1) увеличения мощности радиостанции
- 2) изменения амплитуды высокочастотных колебаний со звуковой частотой
- 3) изменения амплитуды колебаний звуковой частоты
- 4) задания определенной частоты излучения данной радиостанции

**Решение**



- A27.** На рисунке показан график колебаний силы тока в колебательном контуре с антенной. Определите длину электромагнитной волны, излучаемой антенной.



- 1)  $0,83 \cdot 10^{-6}$  м    2) 0,75 м    3) 0,6 м    4) 1,2 м

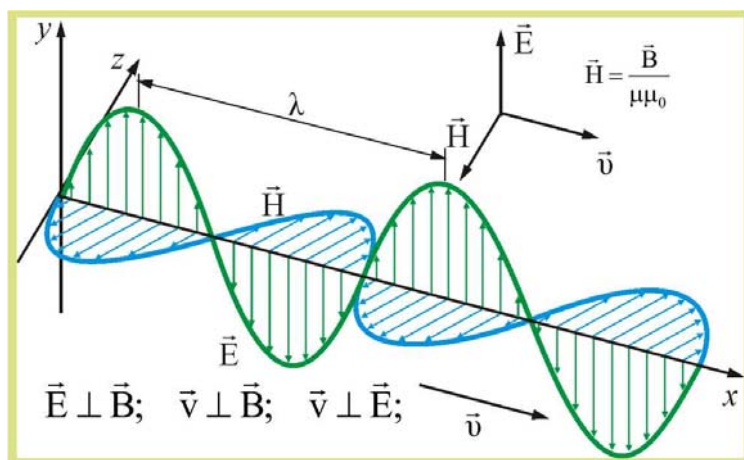
**Решение**

$$T = 4 \cdot 10^{-9} \text{ с}; \quad v = \frac{1}{T} = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Гц}; \quad c = \lambda v; \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{c}{v} = 1,2 \text{ м};$$

- A28.** В радиоволне, распространяющейся в вакууме со скоростью  $\vec{v}$ , происходят колебания векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и индукции магнитного поля  $\vec{B}$ . При этих колебаниях векторы  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{v}$  имеют следующую взаимную ориентацию

- 1)  $\vec{E} \perp \vec{B}$ ,  $\vec{E} \parallel \vec{v}$ ,  $\vec{B} \parallel \vec{v}$
- 2)  $\vec{E} \perp \vec{B}$ ,  $\vec{E} \perp \vec{v}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{v}$
- 3)  $\vec{E} \parallel \vec{B}$ ,  $\vec{E} \perp \vec{v}$ ,  $\vec{B} \perp \vec{v}$
- 4)  $\vec{E} \parallel \vec{B}$ ,  $\vec{E} \parallel \vec{v}$ ,  $\vec{B} \parallel \vec{v}$

**Решение**



- B2.** Радиостанция работает на частоте  $4 \cdot 10^8$  Гц. Чему равна длина волны, излучаемой антенной радиостанции? Ответ округлите до целых.

**Решение**

$$\lambda = \frac{c}{v} = 0,75 \text{ м} = 75 \text{ см};$$

## 4. Оптика

### 4.1. Геометрическая оптика

#### Прямолинейное распространение света

**A1.** Примером явления, доказывающего прямолинейное распространение света, может быть

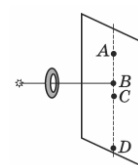
- 1) образование прямого следа в ясном небе от реактивного самолета
- 2) существование тени от дерева
- 3) мираж над пустыней
- 4) постоянство расположения Полярной звезды на небосклоне в течение ночи

**Решение**

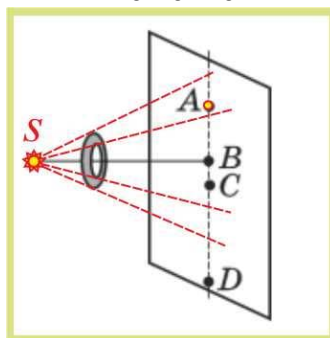


**A2.** Какая из точек на экране окажется в тени кольца, освещаемого точечным источником света?

- 1)  $A$       2)  $B$       3)  $C$       4)  $D$



**Решение**



**A3.** Предмет, освещенный маленькой лампочкой, отбрасывает тень на стену. Высота предмета и его тени различаются в 10 раз. Расстояние от лампочки до предмета меньше расстояния от лампочки до стены в

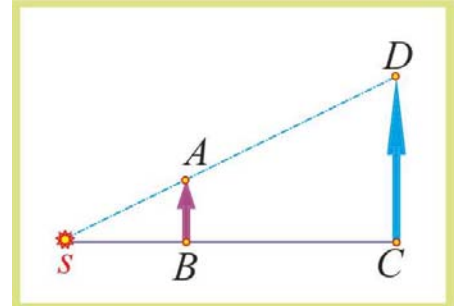
- 1) 7 раз      2) 9 раз      3) 10 раз      4) 11 раз

**Решение**

1. Маленькую лампочку можно считать точечным источником света и использовать принцип лучевого (прямолинейного) распространения света.

2. Из подобия треугольников  $SDC$  и  $SAB$ :

$$\frac{DC}{AB} = \frac{SC}{SB} = 10;$$



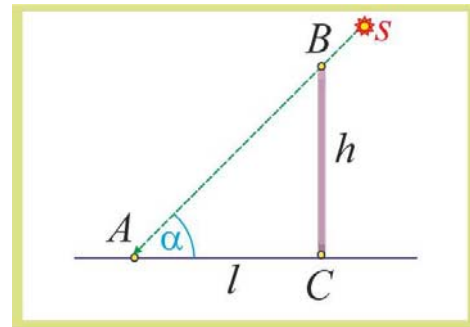
**A4.** Высота Солнца над горизонтом  $45^\circ$ . Определите длину тени, которую отбрасывает вертикально стоящий шест высотой 2 м.

- 1)  $\frac{\sqrt{2}}{2}$  м      2) 2 м      3)  $\sqrt{2}$  м      4)  $2\sqrt{2}$  м

**Решение**

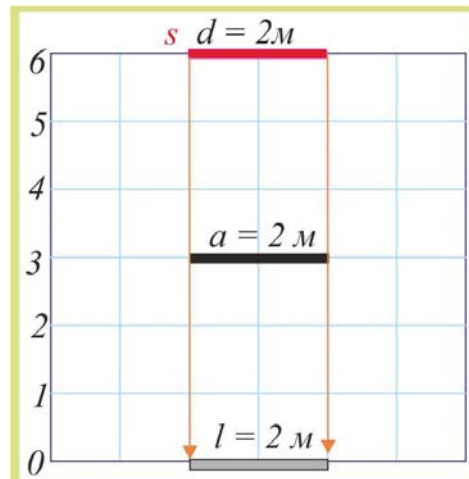
1. Прямоугольник  $ABC$  – прямоугольный и равнобедренный ( $\alpha = 45^\circ$ ), поэтому:

$$l = h = 2\text{ м};$$



**C1.** К потолку комнаты высотой 6 м прикреплено светящееся панно-лампа в виде круга диаметром 2 м. На высоте 3 м от пола параллельно ему расположен непрозрачный квадрат со стороной 2 м. Центр панно и центр квадрата лежат на одной вертикали. Определите минимальный линейный размер тени на полу.

**Решение**

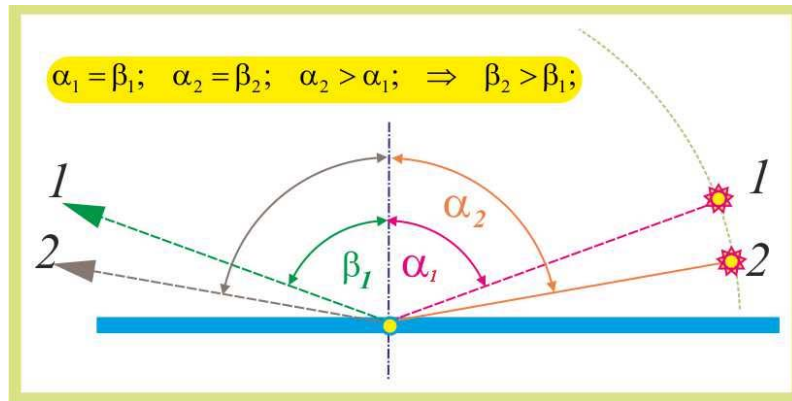


**Отражение света.  
Закон отражения света**

**А5.** Солнце садится за горизонт и отражается в озере. При этом

- 1) угол падения лучей на поверхность озера увеличивается, а угол отражения уменьшается
- 2) угол падения лучей на поверхность озера и угол отражения уменьшаются
- 3) угол падения лучей на поверхность озера и угол отражения увеличиваются
- 4) угол падения лучей на поверхность озера уменьшается, а угол отражения увеличивается

**Решение**

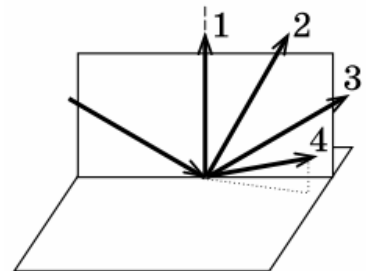


**А6.** Какой из отраженных лучей на рисунке соответствует закону отражения

- 1) 1      2) 2      3) 3      4) 4

**Решение**

1. Угол падения луча равен углу отражения, в этой связи закону соответствует луч 3.



**А7.** Если  $\alpha$  — угол падения,  $\beta$  — угол отражения, то, согласно закону отражения,

- 1)  $\alpha = \beta$       2)  $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$       3)  $\sin \alpha = \cos \beta$       4)  $\frac{\alpha}{\beta} = n$

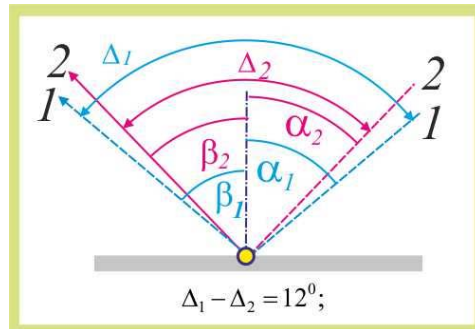
**Решение**

$$\alpha = \beta;$$

**А8.** Угол падения луча на плоское зеркало уменьшили на  $6^\circ$ . При этом угол между падающим и отраженным от зеркала лучами

- 1) увеличился на  $12^\circ$
- 2) увеличился на  $6^\circ$
- 3) уменьшился на  $12^\circ$
- 4) уменьшился на  $6^\circ$

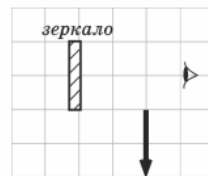
**Решение**



**Плоское зеркало.**

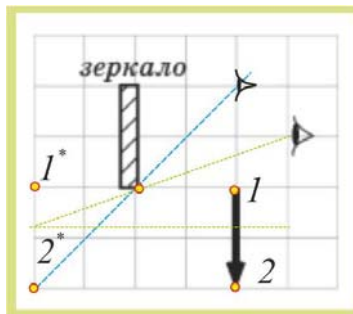
**Построение изображений в плоском зеркале**

**A9.** На сколько клеток и в каком направлении следует переместить глаз наблюдателя, чтобы изображение стрелки в зеркале было видно глазу полностью?

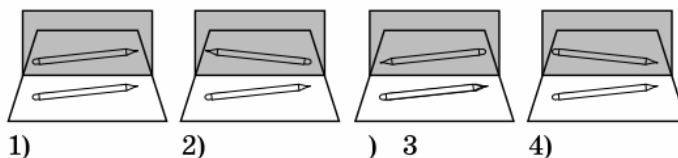


- 1) стрелка и так видна глазу полностью
- 2) на 1 клетку влево
- 3) на 1 клетку вверх
- 4) на 1 клетку вверх и на 1 клетку влево

**Решение**



**A10.** Отражение ручки в плоском зеркале правильно показано на рисунке

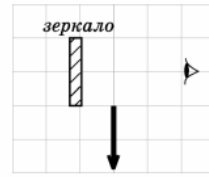


**Решение**

1. Изображение в зеркале мнимое, отстоящее от плоскости зеркала на расстоянии, равном расстоянию от зеркала до предмета. Этому условию удовлетворяет только рис. 4.

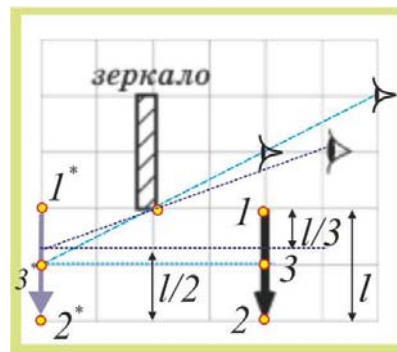


**A11.** Какая часть изображения стрелки в зеркале видна глазу (рис.)? Как надо переместить глаз наблюдателя, чтобы была видна половина стрелки?



- 1)  $\frac{1}{6}$ , на одну клетку вверх
- 2)  $\frac{1}{6}$ , на одну клетку влево
- 3)  $\frac{1}{6}$ , на одну клетку влево или на одну клетку вверх
- 4) стрелка не видна вообще, на одну клетку влево и на одну клетку вверх

**Решение**



**B1.** Расстояние от плоского зеркала до предмета равно 10 см. Чему равно расстояние от этого предмета до его изображения в зеркале?

**Решение**

1. Расстояние от изображения в плоском зеркале до предмета равно удвоенному расстоянию от предмета до зеркала, т.е.  $x = 20$  см.

**Преломление света. Закон преломления света.  
Полное отражение**

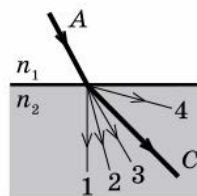
**A12.** Показатель преломления стекла больше показателя преломления воды. При переходе из воды в стекло угол преломления

- 1) больше угла падения
- 2) меньше угла падения
- 3) равен углу падения
- 4) может быть и больше, и меньше угла падения, в зависимости от угла падения

**Решение**

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}; \quad \Rightarrow \quad \beta < \alpha;$$

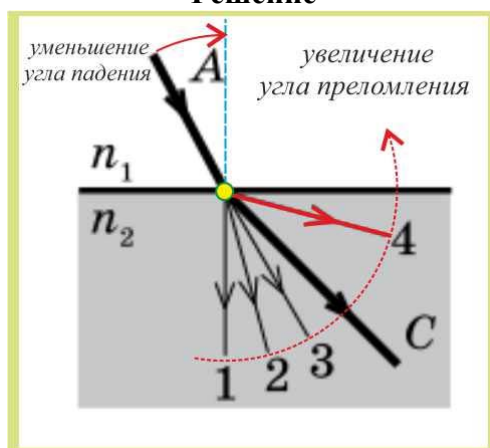
**A13.** Луч  $AB$  преломляется в точке  $B$  на границе раздела двух сред с показателями преломления  $n_1 > n_2$  и идет по пути  $BC$  (рис.). Если показатель  $n_2$  уменьшить, сохранив условие  $n_1 > n_2$ , то луч  $AB$  после преломления пойдет по пути



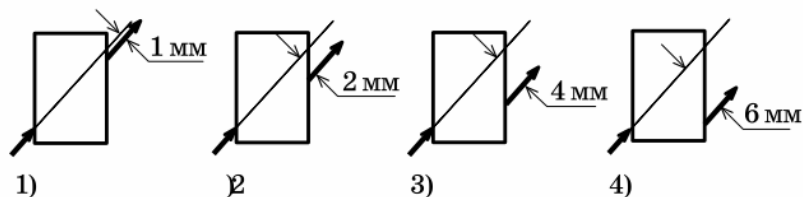
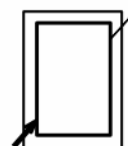
- 1) 1      2) 2      3) 3      4) 4

Ответ:

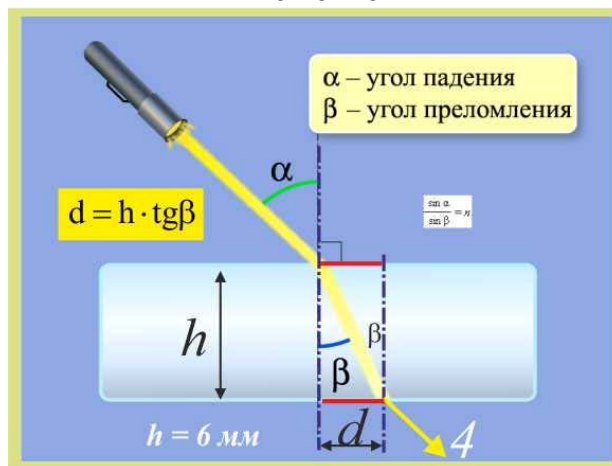
**Решение**



**A14.** В контейнеры с прозрачными стенками направляют луч света. Контейнеры наполнены воздухом, и, кроме того, в них расположены плоскопараллельные стеклянные пластины различной ширины так, как показано на рисунке. В каком из четырех контейнеров толщина пластины максимальная?



**Решение**



**A15.** При прохождении через границу раздела двух сред измерены два угла падения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и два соответствующих им угла преломления  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . О соотношении этих углов можно утверждать, что

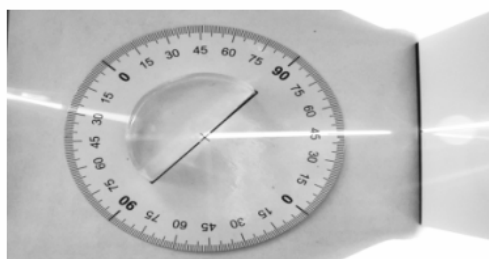
- 1)  $\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}$       3)  $\frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1} = \frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2}$   
 2)  $\frac{\alpha_1}{\gamma_1} = \frac{\alpha_2}{\gamma_2}$       4)  $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2}$

**Решение**

1. Если  $n_1 = \text{const}$ ;  $n_2 = \text{const}$ , то:

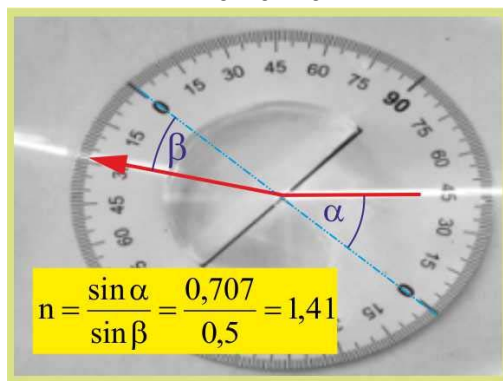
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \gamma_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1};$$

**A16.** На рисунке приведен опыт, фиксирующий прохождение светового пучка, образованного щелью в экране, через полуцилиндрическую пластину. Показатель преломления вещества пластины равен

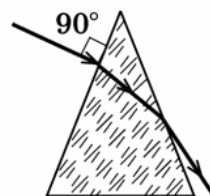


- 1) 1,5      2) 0,6      3) 1,4      4) 0,7

**Решение**



**A17.** На рисунке показано построение возможного хода луча при прохождении его через призму. Что можно сказать о правильности построения преломленного луча на границе воздух-стекло (I) и границе стекло-воздух (II)? При построении закон преломления



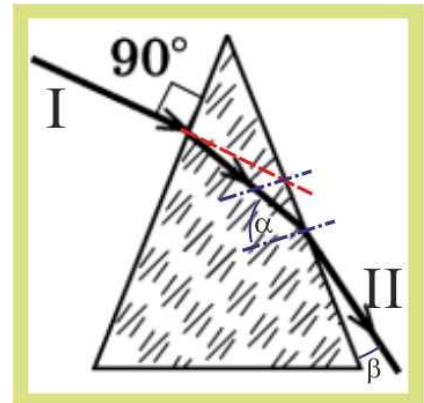
- 1) нарушен на границе I, выполнен на границе II  
 2) нарушен на границе I, нарушен на границе II  
 3) выполнен на границе I, выполнен на границе II  
 4) выполнен на границе I, нарушен на границе II

### Решение

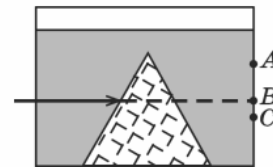
1. Нормально падающие лучи на поверхность стеклянной призмы не преломляются, поэтому ход луча I построен неверно, приведенное на рисунке построение не соответствует закону преломления.

2. На границе стекло – воздух ход луча II соответствует закону преломления т.к.

$$n_{\text{ст}} > n_{\text{воз}}; \Rightarrow \alpha > \beta;$$



**A18.** В аквариум в форме параллелепипеда поставлена стеклянная призма (рис.). Параллельно дну сосуда направляют луч лазера, а затем наливают жидкость. Показатели преломления стекла и жидкости соотносятся как  $n_{\text{ж}} > n_{\text{ст}}$ . Пятно лазерного света на противоположной стенке сосуда при наливании жидкости переместится

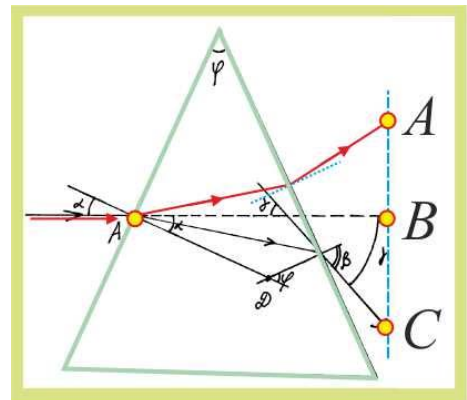


- 1) из B в A    2) из C в B    3) из C в A    4) из A в C

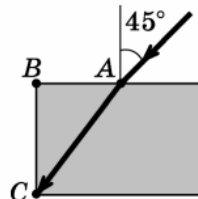
### Решение

1. Построения, выполненные линиями чёрного цвета, соответствуют на качественном уровне распространению луча лазера, падающего из воздуха на стеклянную призму, луч при этом попадает в точку C.

2. Линии красного цвета соответствуют распространению лазерного луча при падении на поверхность стеклянной призмы из воды. При заполнении аквариума водой луч лазера переместится из точки C в точку A.



**C2.** Купив лазерную указку, школьник решил использовать ее для определения показателя преломления неизвестной жидкости. Он взял прямоугольную пластмассовую коробочку с тонкими стенками, налил в нее жидкость и направил луч лазера параллельно одной из стенок так, что, преломившись на поверхности, луч попал точно в угол коробочки (рис.). Оказалось, что угол падения луча  $\alpha = 45^\circ$ . Пометив маркером точку A вхождения луча лазера в коробку, он измерил нужные расстояния  $AB = 6$  см и  $AC = 10$  см и оценил показатель преломления жидкости  $n$ . Какое значение показателя преломления он получил?



### Решение

1. Из прямоугольного треугольника ABC:

$$\angle BAC = \beta; \quad \sin \beta = \frac{6}{10} = 0,6;$$

2. Из закона преломления света:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}; \quad \alpha = 45^\circ; \quad \sin 45^\circ \approx 0,707; \quad \Rightarrow \quad n \approx \frac{0,707}{0,6} \approx 1,18.$$

**С3.** В дно водоема вертикально забита свая длиной 3 м так, что ее верхний конец находится под водой. Найдите длину тени от сваи на дне водоема, если угол падения солнечных лучей на поверхность воды равен  $30^\circ$ .

$$\text{Показатель преломления воды } n = \frac{4}{3}.$$

### Решение

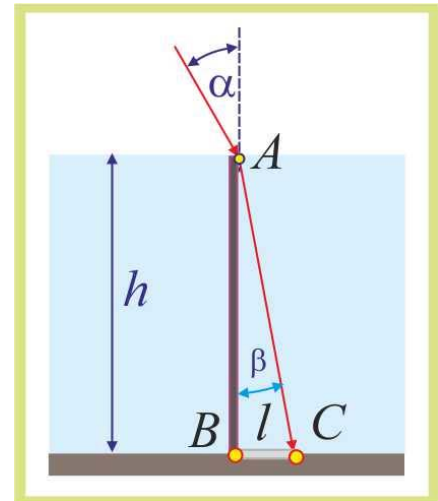
1. Угол преломления луча  $\beta$ :

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \frac{4}{3} \approx 1,33; \quad \sin \alpha = n \sin \beta;$$

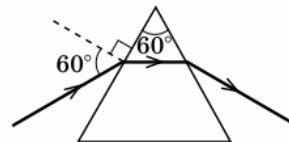
$$\beta = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n}\right) \approx 22^\circ;$$

2. Длина тени, отбрасываемой свайей:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\ell}{h}; \quad \Rightarrow \quad \ell = h \operatorname{tg} \beta \approx 3 \cdot 0,4 \approx 1,2 \text{ м};$$



**С4.** Луч света падает из воздуха на призму под углом  $60^\circ$  (рис.) и выходит из нее под тем же углом. Чему равен показатель преломления призмы?



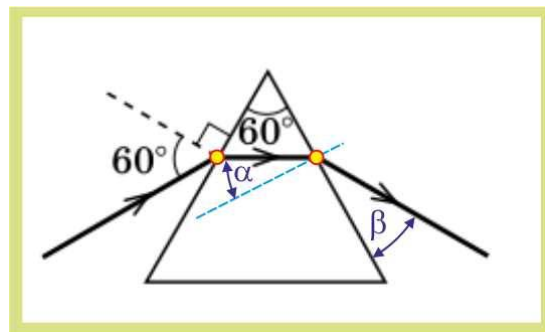
### Решение

1. Из геометрических свойств правильного треугольника следует:

$$\alpha = 30^\circ; \quad \beta = 30^\circ;$$

2. Закон преломления светового луча на границе стекло – воздух:

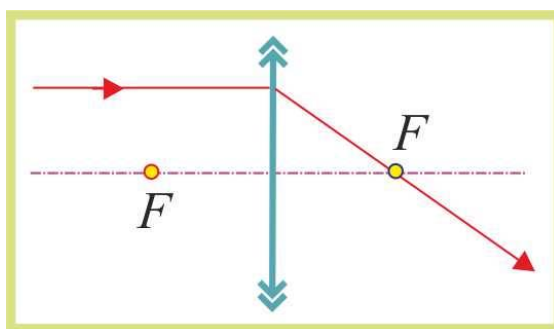
$$\frac{1}{n} = \frac{\sin 30^\circ}{\sin(90^\circ - \beta)}; \quad \Rightarrow \quad n = \frac{0,866}{0,5} = 1,73;$$



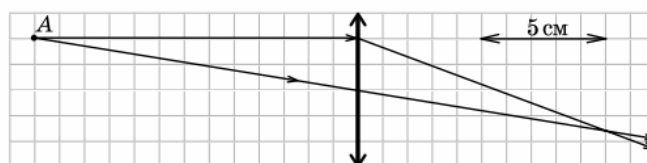
## Линза. Формула тонкой линзы

- A19.** Луч, параллельный оптической оси, после прохождения через рассеивающую линзу пойдет так, что
- 1) будет параллелен оптической оси
  - 2) пересечет оптическую ось линзы на расстоянии, равном фокусному расстоянию
  - 3) пересечет оптическую ось линзы на расстоянии, равном двум фокусным расстояниям
  - 4) его продолжение пересечет оптическую ось на расстоянии, равном фокусному

### Решение

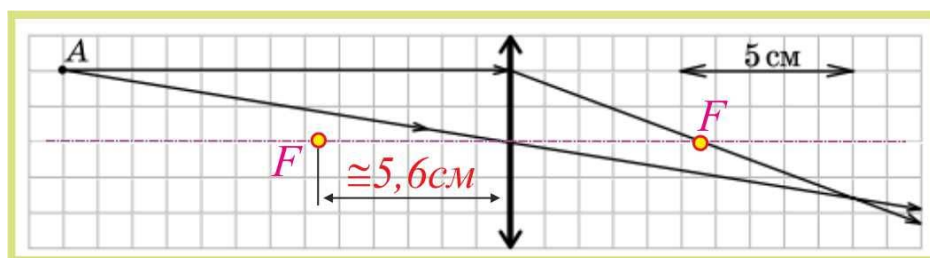


- A20.** На рисунке показан ход лучей от точечного источника света  $A$  через тонкую линзу. Чему равно фокусное расстояние линзы?



- 1) 5,6 см      2) 6,4 см      3) 10 см      4) 13 см

### Решение



**A21.** От удаленного предмета с помощью собирающей линзы получено изображение на экране, удаленном от линзы на расстояние  $d$ . Фокус линзы примерно равен

- 1)  $\frac{d}{2}$     2)  $d$     3)  $\frac{3d}{2}$     4)  $2d$

**Решение**

1. Если предположить, несмотря на запутанность вопроса, что всё же  $d = f$ , то в соответствии с формулой тонкой линзы:

$$F = \frac{df}{d+f} = \frac{d^2}{2d} = \frac{d}{2};$$


---

**C5.** Изображение предмета, расположенного на расстоянии 80 см от тонкой рассеивающей линзы, наблюдается на расстоянии 48 см от нее. Найдите модуль фокусного расстояния рассеивающей линзы.

**Решение**

$$F = \frac{df}{d-f} = \frac{80 \cdot 48}{32} = 120 \text{ см};$$


---

**C6.** С помощью линзы получили мнимое уменьшенное в 2 раза по сравнению с предметом изображение, когда предмет располагался на расстоянии 4 см от линзы. Чему равно фокусное расстояние линзы?

**Решение**

1. Линза рассеивающая, увеличение и фокусное расстояние которой определяются как:

$$\Gamma = \frac{d}{f}; \Rightarrow -2 = \frac{4}{f}; \quad f = -2 \text{ см}; \quad F = \frac{df}{d-f} = \frac{4 \cdot 2}{2} = 4 \text{ см};$$


---

**C7.** Определите увеличение, даваемое линзой, фокусное расстояние которой равно  $F = 0,26$  м, если предмет отстоит от нее на расстоянии  $a = 30$  см.

**Решение**

1. Расстояние от линзы до изображения:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}; \Rightarrow F = \frac{ab}{a+b}; \quad Fa + Fb = ab; \quad Fa = ab - Fb = b(a - F);$$

$$b = \frac{Fa}{a - F} = \frac{0,26 \cdot 0,3}{0,3 - 0,26} = \frac{7,8 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-2}} = 1,95 \text{ м};$$

2. Увеличение, даваемое линзой:

$$\Gamma = \frac{b}{a} = \frac{1,95}{0,3} = 6,5;$$


---

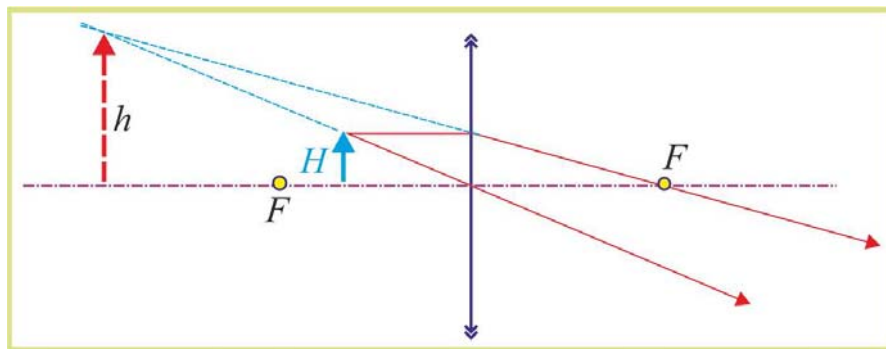


**Построение изображения,  
даваемого собирающей линзой**

**A22.** Предмет расположен от собирающей линзы на расстоянии, меньшем фокусного расстояния. Изображение предмета

- 1) мнимое и прямое
- 2) действительное и прямое
- 3) действительное и перевернутое
- 4) мнимое и перевернутое

**Решение**



**A23.** Прямая нить накала лампы размером  $d$ , параллельная плоскости линзы и находящаяся на расстоянии  $a$  от линзы, дает четкое изображение на экране, расположенном на расстоянии  $b$  от линзы. Размер изображения равен

- 1)  $d \frac{a}{b}$
- 2)  $d \frac{b}{a}$
- 3)  $d \frac{a}{a+b}$
- 4)  $d \frac{b}{a+b}$

**Решение**

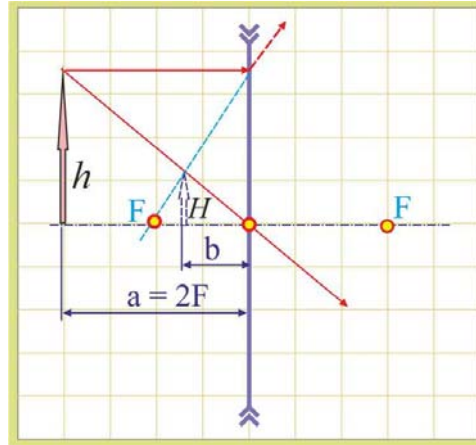
$$\Gamma = \frac{b}{a} = \frac{h}{d}; \Rightarrow h = d \frac{b}{a};$$

**A24.** Фокусное расстояние рассеивающей линзы равно по модулю 5 см. Найдите построением, где будет расположено изображение предмета, стоящего перпендикулярно оптической оси линзы на расстоянии 10 см от нее.

- 1)  $\approx 3,3$  см
- 2)  $\approx 5$  см
- 3)  $\approx 10$  см
- 4)  $\approx 15$  см



### Решение

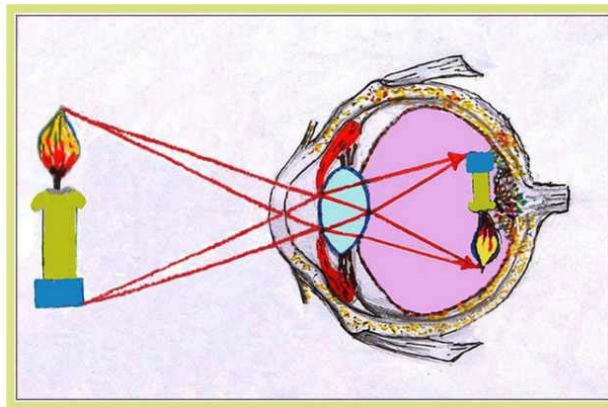


### Оптические приборы

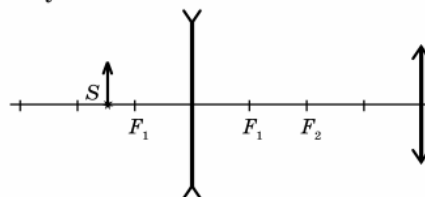
**A25.** Человек с нормальным зрением рассматривает предмет невооруженным глазом. На сетчатке глаза изображение предметов получается

- 1) увеличенным прямым
- 2) увеличенным перевернутым
- 3) уменьшенным прямым
- 4) уменьшенным перевернутым

### Решение

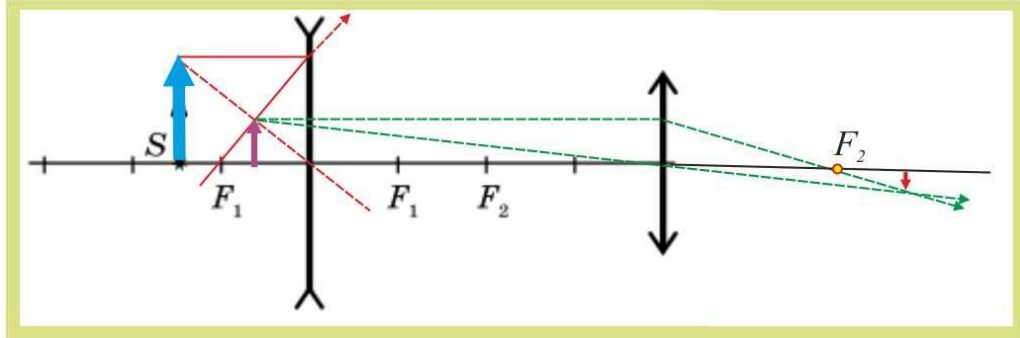


**A26.** Фокусы рассеивающей линзы оптической системы обозначены на рисунке  $F_1$ , фокус собирающей —  $F_2$ . Изображение предмета, расположенного в точке  $S$ , в этой оптической системе получается



- 1) мнимым перевернутым
- 2) мнимым прямым
- 3) действительным перевернутым
- 4) действительным прямым

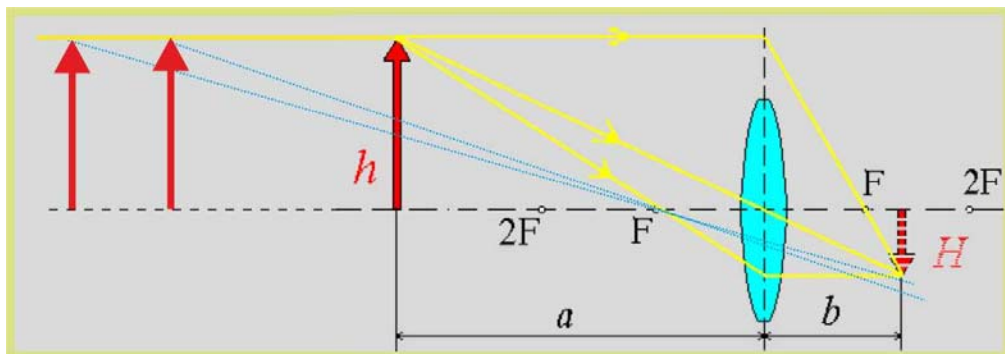
**Решение**



**A27.** При фотографировании удаленного предмета фотоаппаратом, объективом которого служит собирающая линза с фокусным расстоянием  $f$ , плоскость фото пленки находится от объектива на расстоянии

- 1) большем, чем  $2f$
- 2) равном  $2f$
- 3) между  $f$  и  $2f$
- 4) равном  $f$

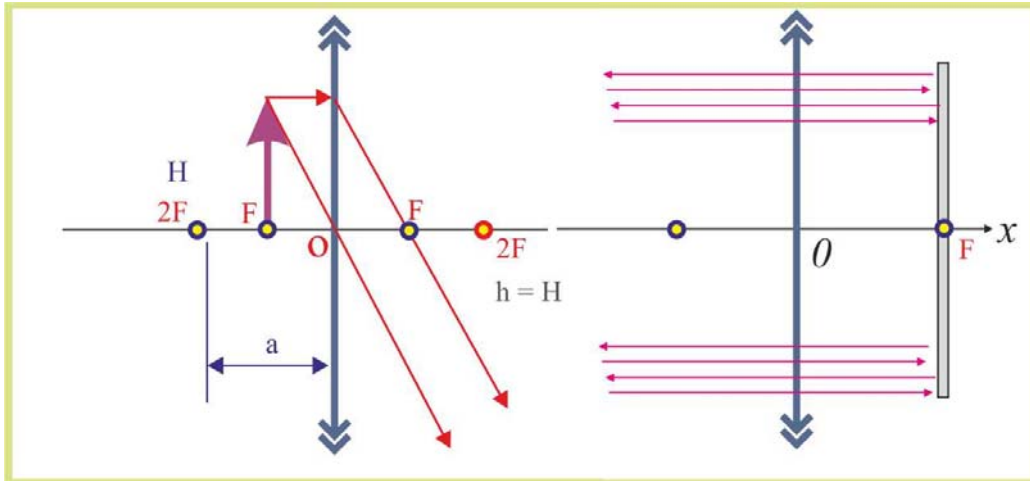
**Решение**



**A28.** На оси  $X$  в точке  $x_1 = 0$  находится тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием  $f = 60$  см, а в точке  $x_2 > 0$  — плоское зеркало, перпендикулярное оси  $X$ . Главная оптическая ось линзы лежит на оси  $X$ . На линзу по оси  $X$  падает параллельный пучок света из области  $x < 0$ . Пройдя оптическую систему, пучок остается параллельным. Определите расстояние  $l$  от линзы до зеркала.

- 1) 30 см
- 2) 60 см
- 3) 90 см
- 4) 120 см

**Решение**



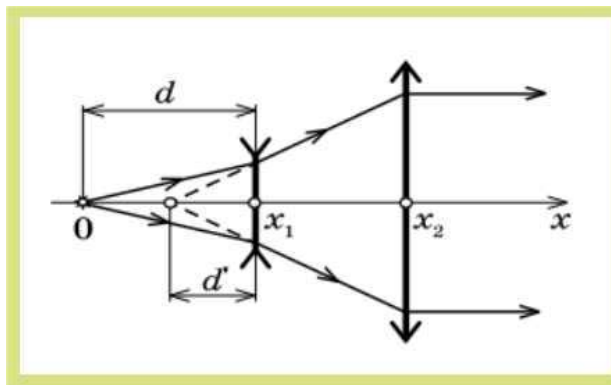
- С8.** Определите оптическую силу объектива проекционно-го аппарата, если он дает 30-кратное увеличение, когда слайд находится от него на расстоянии 25 см.

**Решение**

$$\Gamma = \frac{b}{a}; \Rightarrow b = \Gamma a = 7,5\text{м}; \quad F = \frac{ab}{a+b} = \frac{0,25 \cdot 7,5}{7,75} = 0,242\text{см}; \quad D = \frac{1}{F} = 4,13 \frac{1}{\text{м}}$$

- С9.** На оси  $X$  в точке  $x_1 = 10$  см находится тонкая рассеивающая линза, а в точке  $x_2 = 30$  см — тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием  $f_2 = 24$  см. Главные оптические оси обеих линз лежат на оси  $X$ . Свет от точечного источника, расположенного в точке  $x = 0$ , пройдя данную оптическую систему, распространяется параллельным пучком. Найдите оптическую силу  $D$  рассеивающей линзы.

**Решение**



$$(x_2 - x_1) + d^* = F_2; \Rightarrow d^* = 4\text{см};$$

$$F_1 = \frac{dd^*}{d - d^*} = \frac{10 \cdot 4}{6} \approx 6,67\text{см}; \quad D = \frac{1}{F_1} = \frac{1}{6,67 \cdot 10^{-2}} = 15\text{дптр.}$$

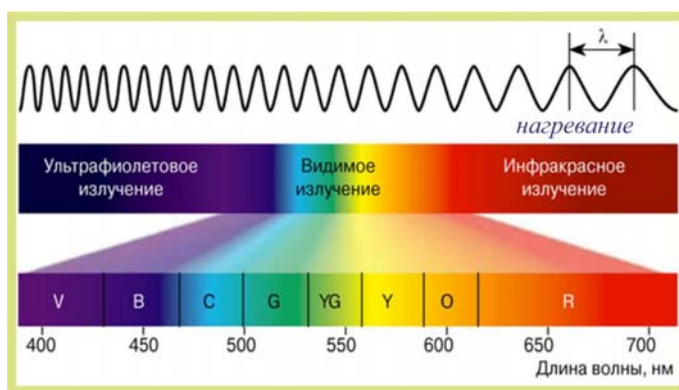
## 4.2. Волновая оптика

Свет — электромагнитная волна.  
Различные виды электромагнитных излучений  
и их практическое применение

**A1.** Как инфракрасное излучение воздействует на живой организм?

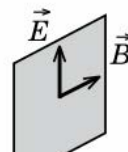
- 1) вызывает фотоэффект
- 2) охлаждает облучаемую поверхность
- 3) нагревает облучаемую поверхность
- 4) способствует загару

**Решение**



**A2.** На металлическую пластину перпендикулярно ее поверхности падает свет (рис.). Электроны проводимости на поверхности начнут двигаться

- 1) вдоль вектора  $\vec{B}$
- 2) вдоль вектора  $\vec{E}$
- 3) против вектора  $\vec{B}$
- 4) против вектора  $\vec{E}$



**Решение**

1. Свободные электроны металла, имеющие отрицательный заряд, подвержены воздействию электрического поля:

$$F_k = -eE;$$

Под действием силы Кулона электроны будут двигаться в сторону противоположную направлению вектора напряжённости электрической составляющей поля  $\vec{E}$ .

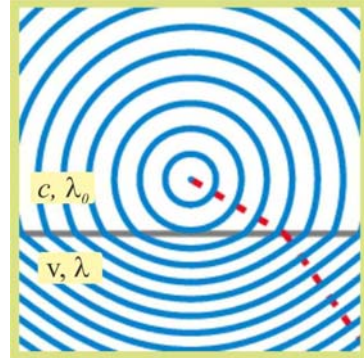
**А3.** В вакууме скорость распространения света  $c$ , а длина волны  $\lambda$ . При попадании этого света в прозрачную среду с показателем преломления  $n$  эти параметры становятся равными

- 1)  $nc$  и  $n\lambda$ ?      2)  $\frac{c}{n}$  и  $n\lambda$ ?      3)  $\frac{c}{n}$  и  $\frac{\lambda}{n}$       4)  $cn$  и  $\frac{\lambda}{n}$

**Решение**

1. Период (частота) изменения кинематических и динамических параметров электромагнитной волны зависят только от природы источника волн, при переходе волны из одной среды в другую изменяется скорость её распространения (длина волны):

$$n = \frac{c}{v} = \frac{v\lambda_0}{v\lambda} = \frac{\lambda_0}{\lambda}; \Rightarrow v = \frac{c}{n}; \lambda = \frac{\lambda_0}{n};$$



**А4.** Скорость света в стекле с показателем преломления  $n = 1,5$ , примерно равна

- 1) 200 000 м/с  
2) 200 000 км/с  
3) 300 000 км/с  
4) 450 000 км/с

**Решение**

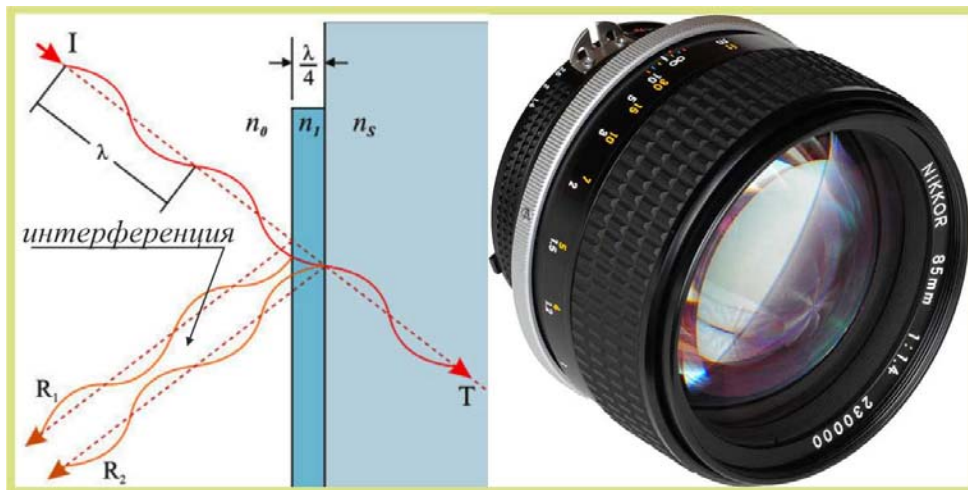
$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,5} = 2 \cdot 10^8 \frac{\text{М}}{\text{с}} \equiv 2 \cdot 10^5 \frac{\text{КМ}}{\text{с}} \equiv 7,2 \cdot 10^6 \frac{\text{КМ}}{\text{час}};$$

**Интерференция света**

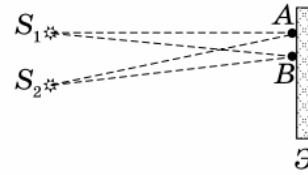
**А5.** Просветление объективов оптических систем основано на явлении

- 1) интерференции света  
2) дисперсии света  
3) поляризации света  
4) дифракции света

**Решение**



**А6.** Свет длиной волны  $\lambda$  от двух синфазных когерентных источников  $S_1$  и  $S_2$  достигает экрана Э. На нем наблюдается интерференционная картина. Темные полосы в точках А и В возникают при выполнении условий



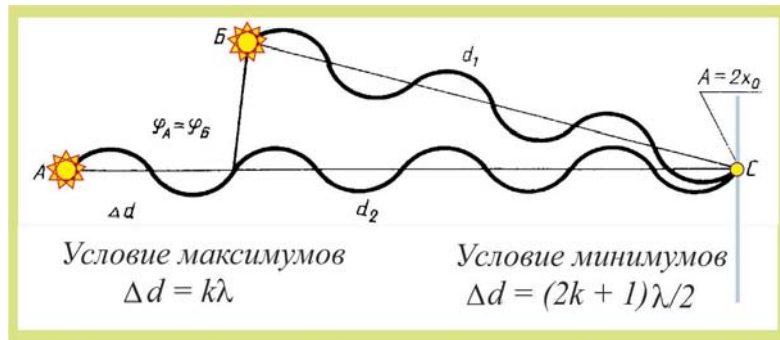
1)  $S_2B = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ;  $S_2A = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ , где  $k, m$  — целые числа

2)  $S_2B - S_1B = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$ ;  $S_2A - S_1A = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}$ , где  $k, m$  — целые числа

3)  $S_2B = \frac{2k\lambda}{2}$ ;  $S_1A = \frac{2m\lambda}{2}$ , где  $k, m$  — целые числа

4)  $S_2B - S_1B = \frac{2k\lambda}{2}$ ;  $S_2A - S_1A = \frac{2m\lambda}{2}$ , где  $k, m$  — целые числа

**Решение**



1. Тёмные полосы характеризуют интерференционные минимумы, в эти точки волны приходят в противофазе и взаимно уничтожаются, если:

$$\left. \begin{aligned} S_2B - S_1B = \Delta d_1; \quad S_2A - S_1A = \Delta d_2, \\ \Delta d_1 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; \\ \Delta d_2 = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}; \end{aligned} \right\} \begin{aligned} k = 0, 1, 2, 3, \dots, n; \\ m = 0, 1, 2, 3, \dots, \xi; \end{aligned}$$

**А7.** Энергия  $W$ , приносимая на единицу площади поверхности экрана одной электромагнитной волной, пропорциональна квадрату амплитуды напряженности электрического поля в ней. Если в данной точке экрана интерферируют две такие когерентные волны с одинаковой амплитудой, то энергия, попадающая за это время на единицу площади поверхности экрана в области интерференционного максимума, равна

- 1) 0                      2)  $W$                       3)  $2W$                       4)  $4W$

**Решение**

$$W_E = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} sd = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V.$$



$$W_E \sim E_m^2; \quad W_{E(1)} + W_{E(2)} \sim 2E_m^2; \quad \Rightarrow \quad W_\Sigma = 4W;$$

**A8.** Два когерентных источника излучают волны с одинаковыми начальными фазами. Периоды колебаний 0,2 с, скорость распространения волн 300 м/с. Максимум интерференции будет наблюдаться в точках, для которых разность хода волн от источников равна

- 1) 30 м, 90 м, 150 м и т. д.
- 2) 60 м, 120 м, 180 м и т. д.
- 3) 30 м, 60 м, 90 м и т. д.
- 4) 15 м, 45 м, 75 м и т. д.

### Решение

1. Длина, испускаемых источниками волн:

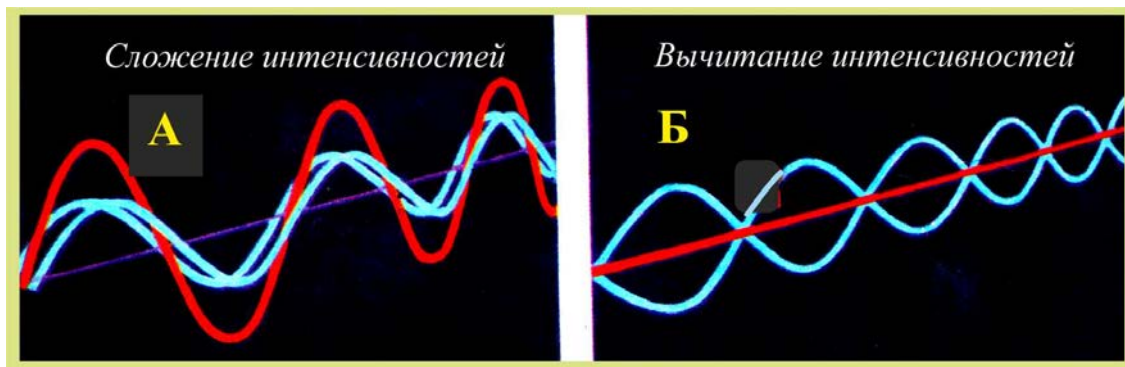
$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \nu T = 60\text{м};$$

2. Условие интерференционных максимумов:

$$\Delta d = k\lambda; \quad (k = 1, 2, 3, \dots); \quad \Delta d_1 = 60\text{м}; \quad \Delta d_2 = 120\text{м}; \quad \Delta d_3 = 180\text{м};$$

**C1.** Два полупрозрачных зеркала расположены параллельно друг другу. На них перпендикулярно плоскости зеркал падает световая волна частотой  $6 \cdot 10^{14}$  Гц. Чему должно быть равно минимальное расстояние между зеркалами, чтобы наблюдался первый минимум интерференции проходящих лучей?

### Решение



1. Длина волны:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8}{6 \cdot 10^{14}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 500\text{нм};$$

2. Условие интерференционного минимума, должно соответствовать минимальному расстоянию между зеркалами:

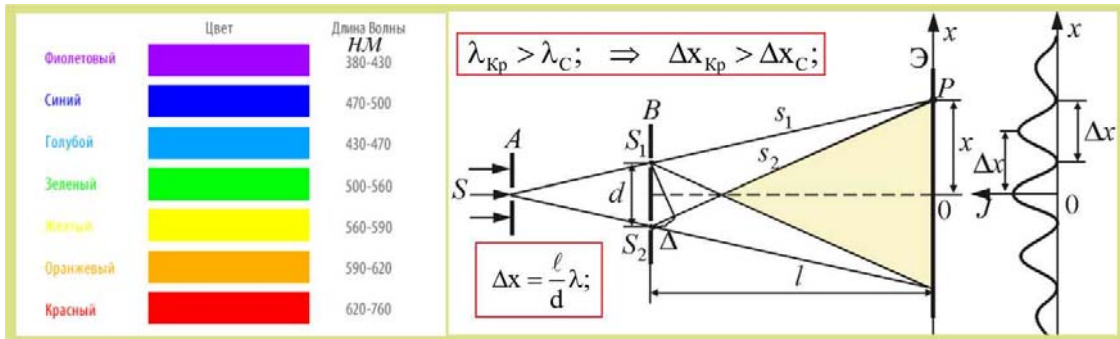
$$\Delta d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}; \quad k = 0; \quad \Delta d = \frac{\lambda}{2} = 250\text{нм};$$

$$\lambda_{\text{Кр}} > \lambda_{\text{С}}; \quad \Rightarrow \quad \Delta x_{\text{Кр}} > \Delta x_{\text{С}};$$

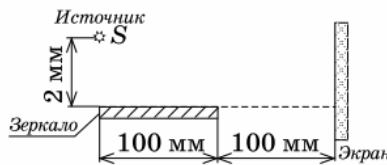
**A9.** На плоскую непрозрачную пластину с узкими параллельными щелями падает по нормали плоская монохроматическая волна из красной части видимого спектра. За пластиной на параллельном ей экране наблюдается интерференционная картина, содержащая большое число полос. При переходе на монохроматический свет из синей части видимого спектра

- 1) расстояние между интерференционными полосами уменьшится
- 2) интерференционная картина станет невидимой для глаза
- 3) расстояние между интерференционными полосами не изменится
- 4) расстояние между интерференционными полосами увеличится

### Решение



**C2.** Монохроматический точечный источник света в оптической системе, представленной на рисунке, излучает свет длиной волны 600 нм. Чему равно расстояние  $x$  между двумя соседними светлыми полосами интерференционной картины на экране в области напротив источника?



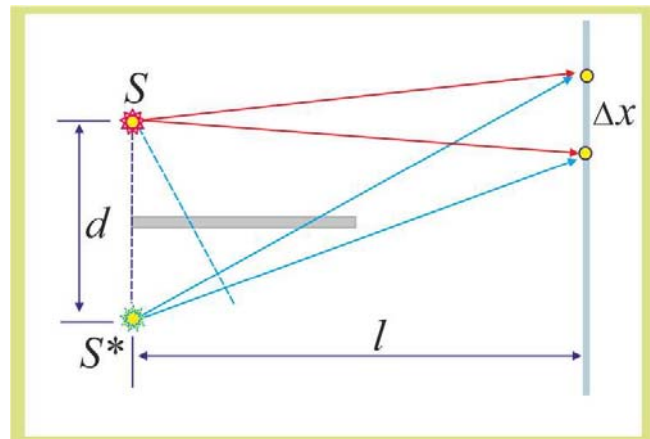
### Решение

1. Интерferируют когерентные источники: действительный точечный источник  $S$  и мнимый  $S^*$ , образованный зеркалом.

2. Расстояние между соседними интерференционными полосами:

$$\Delta x = \frac{l}{d} \lambda = \frac{0,2}{4 \cdot 10^{-3}} 6 \cdot 10^{-7} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м;}$$

$$\Delta x = 30 \text{ мкм;}$$



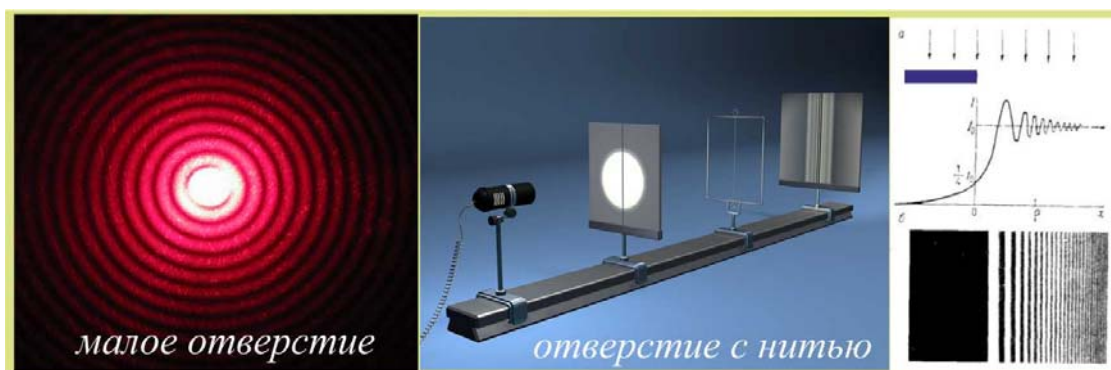


## Дифракция света

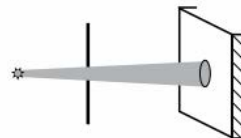
**A10.** В трех опытах на пути светового пучка ставились экраны с малым отверстием, экраны с широким отверстием и с тонкой нитью, пересекающей центр широкого отверстия. Явление дифракции происходит

- 1) только в опыте с малым отверстием в экране
- 2) только в опыте с тонкой нитью
- 3) только в опыте с широким отверстием в экране
- 4) во всех трех опытах

### Решение



**A11.** На экране от круглого отверстия, освещенного небольшой яркой лампочкой, возникает круглое светлое пятно (рис.). Что будет происходить при постепенном уменьшении размера отверстия?

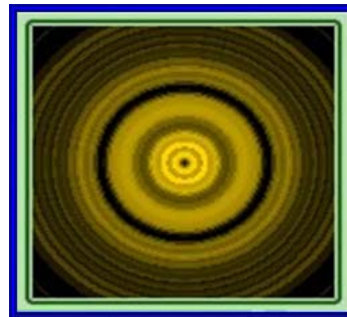


- 1) Размер светлого пятна будет возрастать.
- 2) Размер светлого пятна будет убывать.
- 3) Размер пятна будет уменьшаться, затем возникнет картина чередующихся светлых и темных колец.
- 4) Размер пятна будет уменьшаться, а при некотором критическом размере экран резко станет темным.

### Решение

1. Интенсивность светового пятна будет пропорционально зависеть от площади отверстия до момента проявления дифракционных эффектов.

2. Как только размеры отверстия станут соизмеримы с длиной волны падающего света, светящаяся область экрана будет представлять собой чередование светлых и темных колец.



**A12.** Нарушение закона прямолинейного распространения света при огибании светом препятствия обусловлено

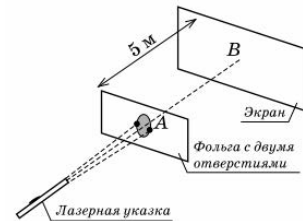
- 1) дисперсией света
- 2) интерференцией света
- 3) дифракцией света
- 4) поляризацией света

**Решение**

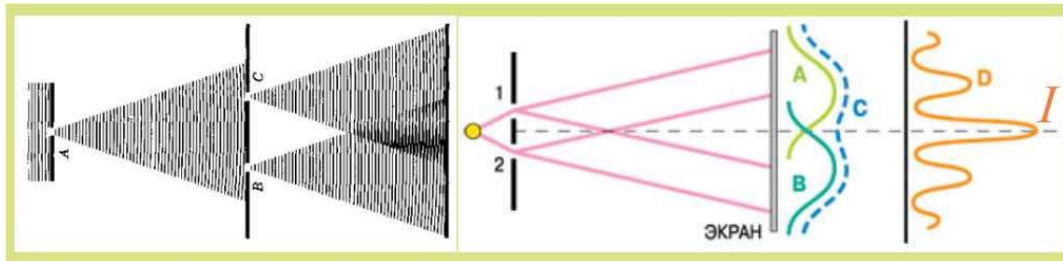


**A13.** Если направить на два узких отверстия, расположенных в фольге на расстоянии  $d = 1$  мм друг от друга, пучок света от лазерной указки, то на экране, расположенном от фольги на расстоянии 5 м, в области геометрической тени в точке  $B$ , расположенной симметрично относительно центров отверстия в фольге, наблюдается

- 1) темнота
- 2) темная полоса
- 3) светлая полоса
- 4) светлый круг

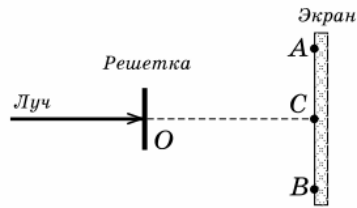


**Решение**



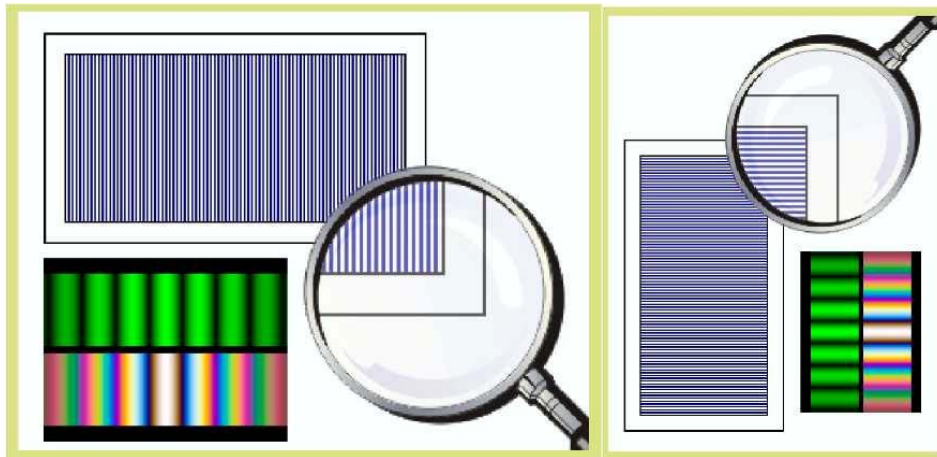
### Дифракционная решетка

**A14.** Лазерный луч падает перпендикулярно на дифракционную решетку. На вертикальной стене наблюдается серия ярких пятен, расположенных вдоль вертикали  $AB$ . Какие изменения произойдут в расположении пятен на экране при повороте решетки на  $90^\circ$  вокруг оси  $OC$  (рис.)?

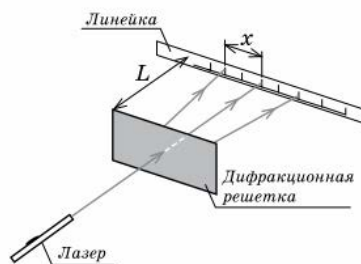


- 1) Расположение пятен не изменится.
- 2) Пятна исчезнут.
- 3) Пятна расположатся на горизонтальной линии.
- 4) Пятно в точке *C* исчезнет, остальные расположатся горизонтально.

**Решение**



**A15.** На рисунке показана установка для измерения длины световой волны с помощью дифракционной решетки. Расстояние от решетки до линейки —  $L$ , период решетки —  $d$ . На решетку падает луч от лазера перпендикулярно плоскости решетки, при этом на линейке на расстоянии  $x \ll L$  друг от друга (рис.) возникают яркие пятна. Длина волны света, излучаемого лазером, равна



- 1)  $xd/L$       2)  $Ld/x$       3)  $xL/d$       4)  $x/Ld$

**Решение**

$$\Delta x = \frac{\ell}{d} \lambda; \Rightarrow \lambda = \frac{\Delta x d}{\ell};$$

**A16.** Лучи от двух лазеров длинами световых волн  $\lambda$  и  $2\lambda$  поочередно направляются перпендикулярно плоскости дифракционной решетки с периодом  $25\lambda$ . Расстояние между нулевым и первым дифракционным максимумами на удаленном экране

- 1) в обоих случаях одинаково
- 2) во втором случае в 2 раза больше
- 3) во втором случае в 2 раза меньше
- 4) во втором случае в 4 раза больше

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_1 &= \frac{\ell}{25\lambda} \lambda = \frac{\ell}{25}; \\ \Delta x_2 &= \frac{\ell}{25\lambda} 2\lambda = \frac{\ell}{12,5}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \Delta x_2 = 2\Delta x_1;$$

**C3.** На дифракционную решетку с периодом  $d = 0,005$  мм нормально к ее поверхности падает параллельный пучок монохроматического света длиной волны  $\lambda = 500$  нм. За решеткой, параллельно ее плоскости, расположена тонкая собирающая линза с фокусным расстоянием  $f = 6$  см. Чему равно расстояние между максимумами первого и второго порядков на экране, расположенном в фокальной плоскости линзы?

**Решение**

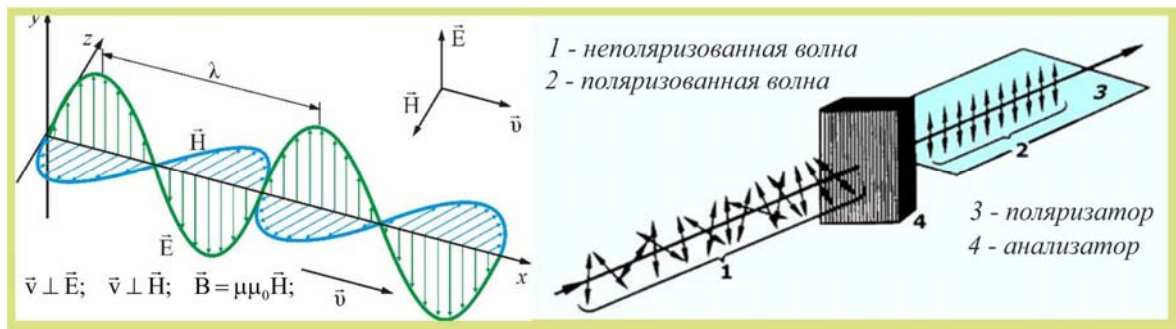
$$\Delta x = \frac{f}{d} \lambda = \frac{6 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} 5 \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ м} \equiv 6 \text{ мкм};$$

### Поляризация света

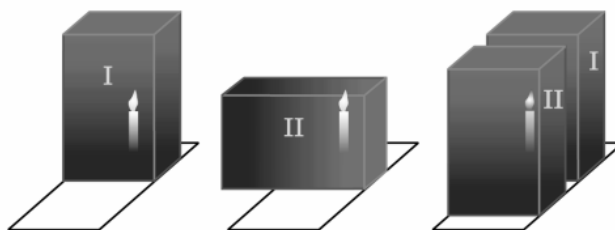
**A17.** Доказательством поперечности световой волны служит

- 1) дифракция
- 2) интерференция
- 3) дисперсия
- 4) поляризация

**Решение**

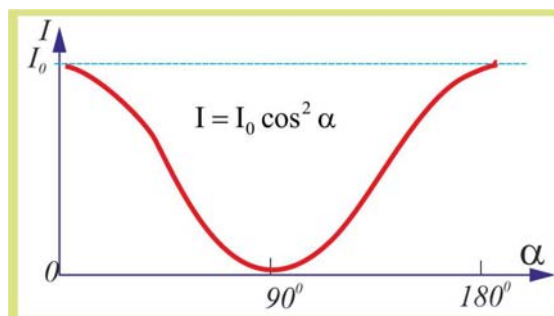


- A18.** Имеются два (I и II) одинаковых кристалла турмалина, с помощью которых изучают поляризацию. При рассматривании через них горящей свечи она видна при всех трех способах расположения кристаллов, показанных на рисунке. Что будет наблюдаться при повороте кристалла II по часовой стрелке на  $180^\circ$  на правом рисунке?



- 1) Картина останется неизменной.
- 2) Поверхность II будет постепенно темнеть и в конце поворота свеча не будет видна сквозь два кристалла.
- 3) Поверхность II будет сначала темнеть, потом посветлеет, и в конце поворота свеча будет видна сквозь два кристалла, как и в исходном положении.
- 4) При повороте на небольшой угол свеча исчезнет и поверхность II останется темной до конца поворота.

### Решение



- A19.** Свет лазера поляризован. Какая из зависимостей энергии света лазера  $W$ , проходящего через поляризатор, от угла поворота  $\theta$  поляризатора в плоскости, перпендикулярной «лучу» лазера, лучше всего отражает экспериментальную зависимость?

- 1)  $W = W_0 \cdot 2^\theta$
- 2)  $W = W_0 - \alpha\theta$
- 3)  $W = W_0 \cos\theta$
- 4)  $W = W_0 \cos^2\theta$

### Решение

1. Закон Малюса:

$$W = W_0 \cos^2 \theta;$$

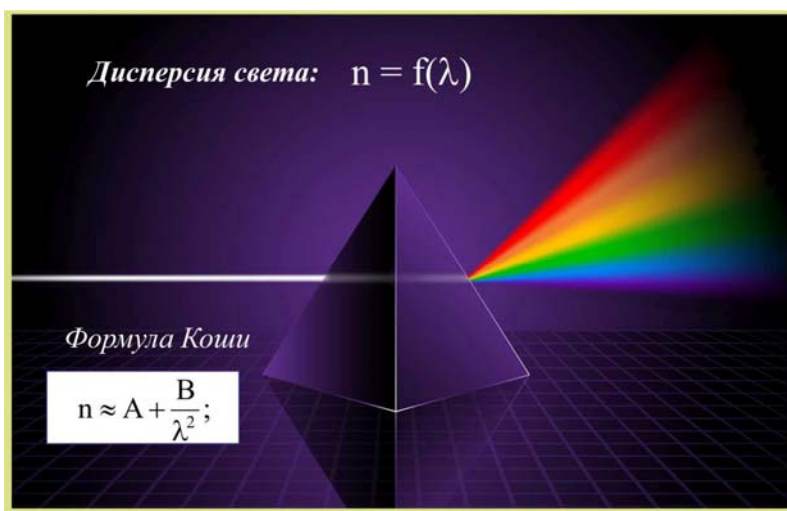


## Дисперсия света

A20. Разложение белого света в спектр при прохождении через призму обусловлено

- 1) интерференцией света
- 2) отражением света
- 3) дисперсией света
- 4) дифракцией света

**Решение**



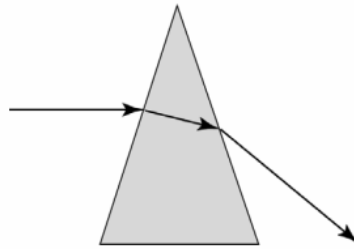
A22. Частота колебаний электрического поля в вакууме у первой волны в 2 раза больше, чем у второй. Волны падают перпендикулярно на пластину из вещества, показатель преломления которого для первой волны на 2% больше. Число волн, укладывающихся в толщине пластины, для первой волны

- 1) в 2,04 раза больше
- 2) в 2,04 раза меньше
- 3) на 2% больше
- 4) на 2% меньше

**Решение**

$$\left. \begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{h}{\lambda_0}; \\ \zeta_2 &= \frac{h}{2\lambda_0 + 0,02\lambda_0}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\zeta_1}{\zeta_2} = \frac{2\lambda_0 + 0,02 \cdot 2\lambda_0}{\lambda_0} = 2,04;$$

**В1.** На призму треугольного сечения падает пучок света красного лазера (рис.).



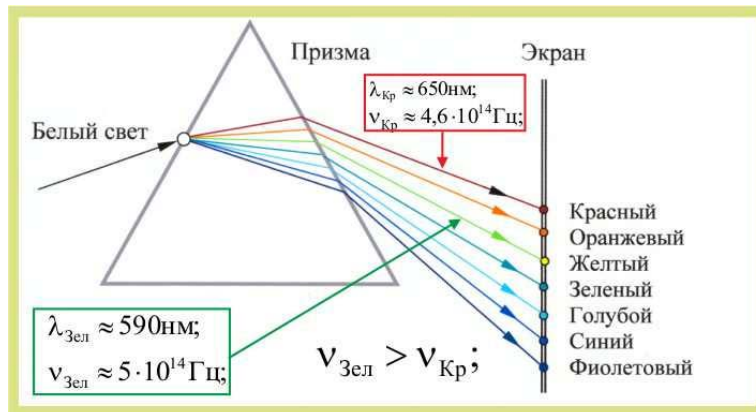
Затем на ту же призму под тем же углом пускают пучок зеленого лазера. Как при этом изменятся следующие величины: частота излучения, падающего на призму; скорость света в материале призмы?

Для каждой величины определите соответствующий характер ее изменения:

- 1) увеличится      2) уменьшится      3) не изменится

### Решение

1. Частота излучения, падающего на призму, при смене лазера с красного на зелёный возрастёт:



2. Скорость света в материале призмы уменьшится:

Цвет	Длина волны в воздухе, нм	Частота, $10^{14}$ Гц	Показатель преломления	Скорость распространения в стекле, м/с
Красный	656,3	4,57	1,5145	$1,9795 \cdot 10^8$
Желтый	589,3	5,09	1,5170	$1,9762 \cdot 10^8$
Зеленый	546,1	5,49	1,5191	$1,9735 \cdot 10^8$
Синий	480,0	6,25	1,5235	$1,9678 \cdot 10^8$
Фиолетовый	404,7	7,41	1,5318	$1,9571 \cdot 10^8$

## 5. Основы специальной теории относительности

### 5.1. Специальная теория относительности

#### Инвариантность скорости света

- A1.** Какой материальный объект может двигаться со скоростью, большей скорости света  $c$ ?
- 1) Субсветовой электрон относительно другого субсветового электрона, движущегося навстречу первому.
  - 2) Протон в ускорителе относительно ускорителя.
  - 3) Электромагнитная волна относительно движущегося источника света.
  - 4) Ни один из материальных объектов.

#### Решение

1. Основой современной теории относительности, в отличие от принципов относительности Галилея, является **постулирование постоянства скорости света, как максимально возможной в Природе**. Знаменитый Советский физик А.И. Китагордский, предваряя изложение теории относительности, написал: «На первый взгляд принцип постоянства скорости света противоречит «здравому смыслу». Поэтому желательно, прежде чем мы начнем выводить следствия из теории относительности, указать непосредственные опытные доказательства его справедливости».

2. Вопрос необходимости доказательств поставлен Китайгородским вполне уместно, потому что, несмотря на доступность, свет – как объект физического исследования является далеко неизученным в своих многочисленных нюансах, одни из которых является его скорость распространения.

3. Теория относительности, представленная на суд научной общественности Альбертом Эйнштейном, являлась, по сути, симбиозом работ двух знаменитых учёных, Лоренца и Пуанкаре.

4. В 1905 г. неизвестный до того в научных кругах Эйнштейн опубликовал работу «К электродинамике движущихся тел», объединившую идеи Лоренца и Пуанкаре. Основопологающим стержнем развиваемой теории был постулат о неизменности скорости света, в независимости от относительного движения систем отсчёта. Там говорилось: «... свет в пустоте всегда распространяется с определённой скоростью, не зависящей от движения, излучающего его тела». В соответствии с этим постулатом скорость света  $c \cong 3 \cdot 10^8$  м/с не должна зависеть от скорости источника и приёмника.

5. Такой постулат содержит одновременно два утверждения. Первое – скорость света обладает определённой величиной. Второе – скорость света не подчиняется классическому закону сложения скоростей

6. И если первое утверждение, с методологической точки зрения, не является необычным, то второе – требует особого рассмотрения.



7. Дело в том, скорость, являясь одной из основных мер движения материальных объектов, по сути своей, представляет собой величину относительную. Как следует из повседневного опыта, на что впервые обратил внимание Галилео Галилей, величина скорости зависит от режима движения системы отсчёта. Другими словами, скорость одного и того же объекта может быть различной, будучи измеренной в разных системах отсчёта. Каждый замечал, что скорость встречного автомобиля несколько больше, чем скорость обгоняющего авто, при прочих равных условиях. Пассажир любого транспортного средства имеет нулевую скорость относительно системы отсчёта, связанной с движущимся прямолинейно и равномерно самолётом, автомобилем и т.д. **Без указания системы отсчёта определение скорости теряет здравый смысл.**

8. Отметим, что постоянной считается скорость, при которой наблюдаемый объект за равные промежутки времени имеет одинаковые перемещения. Закон геометрического сложения скоростей распространяется не только на тела, но и на другие материальные объекты. Так, например, скорость звука в неподвижной среде равна, примерно, 340 м/с, в случае движения источника упругих волн, скорость звука будет уже иной. Это очевидно и широко используется в рамках классических представлений.

9. По не вполне понятным причинам, для скорости света сделано исключение. В эйнштейновском постулате предписывается считать скорость света  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с постоянной для любых систем отсчёта движущихся равномерно и прямолинейно.

10. При таком раскладе скорость света определена как некое философическое понятие безотносительно к чему-либо материальному, перемещающемуся в трёхмерном пространстве.

11. Такое утверждение противоречит самому определению скорости, которая с физической точки зрения является не самостоятельной, а производной величиной от длины и времени, действительно, мгновенная скорость математически определяется как:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right];$$

В теории же относительности скорость поставлена в разряд основных величин, а расстояния и времена приобретают свойства зависимых величин.

12. Теория относительности, как таковая обязана электродинамике Максвелла, Герца, Хевисайда. Электродинамические уравнения Максвелла, Герца, Хевисайда выглядят в интегральной форме следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \text{(I)} \quad \oint_S \vec{E} d\vec{S} &= \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV; \\ \text{(II)} \quad \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0; \\ \text{(III)} \quad \oint_\ell \vec{E} d\vec{\ell} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}; \\ \text{(IV)} \quad \oint_\ell \vec{B} d\vec{\ell} &= \mu_0 \oint_S \left( \vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \end{aligned} \right\}$$

13. Записанные в интегральной форме уравнения наделали много шума в физическом мире своей необычностью и новизной. В момент их появления многие обратили внимание на то, что для этих, изначально 22 уравнений Максвелла, не выполняется

ся закон сохранения энергии. Патриарх классической электродинамики Гельмгольц был одним из первых, кто подверг уравнения Максвелла жёсткой критике и поручил своему аспиранту Генриху Герцу провести серию экспериментов, с целью положить конец теоретическим изыскам относительно юного англичанина. Наука тоже не была лишена национального соперничества.

14. Герц провёл серию совершенно гениальных экспериментов, открыв электромагнитные волны. Оказалось, что часть потерянной в уравнениях энергии уносится этими новыми необычными волнами. Справедливость закона сохранения энергии восторжествовала. Используя математический аппарат, разработанный Оливером Хевисайдом, Герцу удалось систему уравнений Максвелла свести к четырём лаконичным уравнениям, записанным выше.

15. В уравнениях было много чего необычного, кроме непоняток с законом сохранения энергии. В них отсутствовали параметры среды, хотя в прочих уравнениях, например, в волновом уравнении для упругих волн

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2},$$

в явном виде присутствовала скорость распространения волны  $v$ , которая определяется параметрами среды

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

где  $E$  – модуль упругости среды,  $\rho$  – плотность среды. Для электромагнитных волн на основании уравнений Максвелла, Герца, Хевисайда получались следующие волновые уравнения

$$\begin{aligned} \vec{i} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \vec{j} \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + \vec{k} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}, \\ \vec{i} \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \vec{j} \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \vec{k} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} &= \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2}, \end{aligned}$$

где  $(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$  – единичные векторы,  $(x, y, z)$  – координаты,  $E$  – напряжённость электрического поля,  $H$  – напряжённость магнитного поля,  $\epsilon_0 \cong 8,854 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>·Н,  $\mu_0 \cong 1,257$  Н·с<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup> – электрическая и магнитная постоянные.

16. Сравнивая волновые уравнения для упругих и электромагнитных волн, логично предположить, что

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}} \cong \sqrt{\frac{1}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 1,257 \cdot 10^{-6}}} \cong \sqrt{8,985147372} \cong 2,9975 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

17. Комбинация двух констант давала константу, которая с высокой степенью точности совпадала с измеренными значениями скорости света. Получалось, что электромагнитные волны могли распространяться в отсутствие среды со скоростью света.

18. 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.

19. Французский исследователь Пуанкаре, исследуя преобразования Лоренца в совокупности с уравнениями Максвелла, Герца, Хевисайда пришёл к выводу, что все физические законы, касаемо электромагнитного поля, не должны изменяться от преобразований Лоренца и математически это доказал. Он был виртуозным математиком классической школы.

20. 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 вех времён и одного народа.

21. 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

$$m \cong \frac{1 \cdot 10^{-30}}{\sqrt{1 - \frac{9 \cdot 10^{12}}{9 \cdot 10^{16}}}} \cong 9,9995 \cdot 10^{-29} \text{ кг};$$

22. 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 изменяться

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где  $L_0$  – размер покоящегося тела,  $L$  – размер того же тела в направлении движения.

23. Изменение геометрических размеров при сохранении неизменной скорости света должно накладывать определённые условия на течение времени. Из преобразований Лоренца следовало, что

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

24. Запишем далее основное уравнение динамики в виде

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

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

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

Записанное уравнение представляет собой модифицированное преобразованиями Лоренца уравнение импульса в классическом варианте Ньютона.

$$\sum_{i=1}^{i=n} \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

25. 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

$$\text{при } v \cong c, \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow 0; \Rightarrow p \rightarrow \infty;$$

26. Из уравнений Ньютона следует, в частности, что если на некий материальный объект неопределённо долго воздействовать постоянной силой, то нет 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.

27. 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.

5. 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

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

28. 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, необ-

ходимо ввести в рассмотрение два вида энергии: энергию покоя и энергию движения.

29. 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

$$\Delta E = \Delta mc^2;$$

30. Далее, для того чтобы преобразования Лоренца были справедливы не только в кинематике но и в динамике, стало необходимым приписать каждому материальному объекту энергию

$$E = mc^2;$$

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, Хевисайд не размышлял. Это откровение появилось при совмещении уравнений Максвелла и преобразований Лоренца.

31. Преобразования Лоренца 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.

32. Уравнение для сложения скоростей в релятивистском случае представилось следующим образом

$$v_{\Sigma} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}};$$

33. Предположим, что некий объект движется со скоростью  $v_1 = \frac{1}{2}c$ , внутри этого объекта начинает движение походу второй объект тоже со скоростью  $v_2 = \frac{1}{2}c$ , подставим эти значения скоростей в уравнение  $v_{\Sigma}$

$$v_{\Sigma} = \frac{0,5c + 0,5c}{1 + \frac{0,5c \cdot 0,5c}{c^2}} = \frac{1}{1,25}c = 0,8c;$$

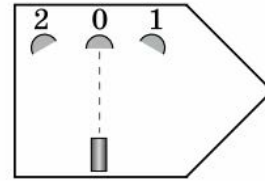
34. Таким образом, при движении куба по гипотезе относительности его размеры должны меняться в направлении движения (ещё раз подчеркнём, что уравнения Максвелла, Герца, Хевисайда и их обобщения сделанные в работах Пуанкаре, Лоренца были посвящены исключительно электромагнитному полю, ни о каких объектах, обладающих массой покоя, речи там не шло). Размер куба в направлении движения определится, теоретически, как:

$$L_x = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1 \sqrt{1 - (0,75)^2} \cong 0,66m, \quad \Rightarrow V = L_0^2 L_x \cong 0,66 m^3;$$

35. Таким образом, при аннигиляции двух частиц одинаковой массы  $m$  предполагается выделение кванта излучения с энергией:

$$\Delta E = 2mc^2;$$

**A2.** Луч лазера в неподвижной ракете попадает в приемник, расположенный в точке 0 (рис.). В какую точку (1 или 2) надо поместить приемник в ракете, движущейся с постоянной скоростью вправо, чтобы луч лазера попал в него?



- 1) 1, независимо от скорости ракеты
- 2) 0, независимо от скорости ракеты
- 3) 2, независимо от скорости ракеты
- 4) 0 или 1, в зависимости от скорости ракеты

### Решение

1. В соответствии с идеологией ОТО приёмник нужно помещать в точку 0 независимо от скорости ракеты и её направления.

**A3.** В вакууме ядро испускает два электрона в противоположных направлениях со скоростями  $0,8c$ , где  $c$  — скорость света в вакууме. В системе отсчета, связанной с ядром, расстояние между ними увеличивается по закону

- 1)  $2ct$
- 2)  $0,98ct$
- 3)  $ct$
- 4)  $1,6ct$

### Решение

$$v_{\Sigma} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \quad v_r = \frac{0,8c + 0,8c}{1 + \frac{0,8c \cdot 0,8c}{c^2}} = \frac{1,6}{1,64}c = 0,976c; \quad S = 0,98ct;$$

**A4.** В некоторой системе отсчета с одинаковыми скоростями  $100\,000$  км/с движутся навстречу друг другу две светящиеся кометы. Скорость света, испущенного первой кометой относительно другой кометы, равна

- 1)  $400\,000$  км/с
- 2)  $100\,000$  км/с
- 3)  $300\,000$  км/с
- 4)  $180\,000$  км/с

### Решение

$$v_r \approx c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

**Принцип  
относительности Эйнштейна  
(Пуанкаре, Лоренца)**

- А5.** Одинаковые опыты по наблюдению спектра водорода выполнялись в одинаковых лабораториях — на Земле и в космическом корабле, движущемся относительно Земли с постоянной скоростью. Наблюдаемые спектры
- 1) одинаковы
  - 2) существенно различны
  - 3) сходны, но спектральные линии смещены
  - 4) сходны, но ширина спектральных линий различна

**Решение**

1. Спектры испускания и поглощения атома водорода зависят от его свойств и не зависят от параметров движения экспериментальной установки.

---

- А6.** В одной системе отсчета получили связь периода колебаний пружинного маятника от массы груза  $T \sim \sqrt{m}$ . Какая зависимость будет получена в системе отсчета, движущейся относительно этой системы отсчета со скоростью  $v$ , близкой к скорости света  $c$ ?

1)  $T \sim \sqrt{m}$     2)  $T = \text{const}$     3)  $T \sim m$     4)  $T \sim \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

**Решение**

1. В инерциальных системах отсчёта все физические законы идентичны, поэтому, для всех систем, движущихся с постоянной скоростью, включая и пресловутую скорость света:

$$T \sim \sqrt{m};$$

---

**Полная энергия. Энергия покоя**

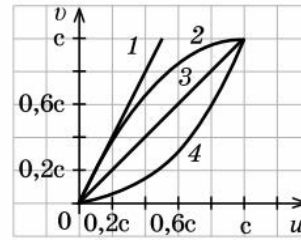
- А7.** Формулы специальной теории относительности необходимо использовать при описании движения
- 1) только микроскопических тел, скорости которых близки к скорости света
  - 2) только макроскопических тел, скорости которых близки к скорости света
  - 3) любых тел, скорости которых близки к скорости света
  - 4) любых тел, движущихся с любой скоростью

**Решение**

1. Преобразования Лоренца, ошибочно считающиеся общей теорией относительности, были введены автором для электромагнитных полей, которые распространяются со скоростями, соизмеримыми со скоростями света в вакууме.

---

**A8.** Относительно наблюдателя две частицы движутся навстречу друг другу с равными по модулю скоростями  $u$ . Какой из графиков правильно отражает зависимость модуля скорости одной частицы  $v$  в системе отсчета, связанной с другой частицей, от скорости  $u$  этой частицы?



- 1) 1                      2) 2                      3) 3                      4) 4

**Решение**

$$v_r = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \approx \frac{0,9c + 0,9c}{1 + \frac{0,81c^2}{c^2}} \approx \frac{1,8}{1,81}c \approx 0,994c; \Rightarrow \text{кривая 2;}$$

**A9.** Время жизни заряженных частиц, покоящихся относительно ускорителя, равно  $\tau$ . Чему равно время жизни частиц, которые движутся в ускорителе со скоростью  $0,6c$ .

- 1)  $\tau$   
 2)  $1,67\tau$   
 3)  $0,8\tau$   
 4)  $1,25\tau$

**Решение**

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \approx \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{0,36c^2}{c^2}}} \approx 0,8\tau;$$

**A10.** Два электрона движутся в противоположные стороны со скоростями  $0,5c$  и  $0,6c$  относительно Земли ( $c$  — скорость света в вакууме). Скорость второго электрона в системе отсчета, связанной с первым электроном, равна

- 1)  $1,1c$   
 2)  $c$   
 3)  $0,85c$   
 4)  $0,1c$

**Решение**

$$v_r = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}} \approx \frac{0,5c + 0,6c}{1 + \frac{0,3c^2}{c^2}} \approx \frac{1,1}{1,3}c \approx 0,846c;$$



**Связь массы и энергии**  
**(Уравнение Дж. Дж. Томсона и Оливера Хевисайда)**

**A11.** Проводится расчет

- А) энергии элементарной частицы, летящей с околосветовой скоростью
- Б) мощности ядерного реактора
- В) мощности реактивного двигателя

Использование понятий или формул специальной теории относительности требуется только

- 1) в случае А
- 2) в случае Б
- 3) в случае В
- 4) в случае А и Б

**Решение**

1. В соответствии с постулатами ОТО ее рекомендуется использовать при наличии релятивистских эффектов, т.е. при скоростях соизмеримых со скоростями света. Этому условию удовлетворяет только случай 1.

---

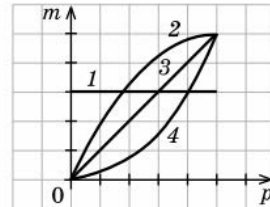
**A12.** Согласно СТО масса частицы выражается через полную

энергию и импульс тела соотношением  $m = \sqrt{\frac{E^2}{c^4} - \frac{p^2}{c^2}}$ .

Какой из графиков верно отражает зависимость массы тела в СТО от импульса частицы?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

Ответ:



**Решение**

$$\bar{p} = m\bar{v} = \frac{m_0\bar{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad v \approx c; \quad m \Rightarrow \infty \Rightarrow 4;$$


---

**A13.** Солнце непрерывно излучает большое количество энергии. Изменение его массы  $\Delta m$  и излученная энергия  $E$  связаны соотношением

- 1)  $E = \frac{\Delta m v^2}{2}$ ,  $v$  — скорость движения Солнца вокруг центра Галактики
- 2)  $E = \Delta m g R$ ,  $g$  — ускорение свободного падения на поверхности Солнца,  $R$  — радиус Солнца
- 3)  $E = \Delta m c^2$ ,  $c$  — скорость света
- 4)  $E = \frac{-G\Delta m}{R}$ ,  $G$  — гравитационная постоянная,  $R$  — радиус Солнца

**Решение**

$$E = \Delta mc^2;$$

**A14.** Масса ядра дейтерия  ${}^2_1\text{H}$  на  $3,9 \cdot 10^{-30}$  кг меньше суммы масс нейтрона и протона. Какая энергия выделяется при ядерной реакции  ${}_1^1p + {}_0^1n \rightarrow {}^2_1\text{H}$ ?

- 1)  $3,9 \cdot 10^{-30}$  Дж
- 2)  $11,7 \cdot 10^{-22}$  Дж
- 3)  $3,5 \cdot 10^{-13}$  Дж
- 4)  $1,75 \cdot 10^{-13}$  Дж

**Решение**

$$E = mc^2; \Rightarrow \Delta E = 3,9 \cdot 10^{-30} \cdot 9 \cdot 10^{16} \approx 3,51 \cdot 10^{-3} \text{ Дж};$$

**C1.**  $\pi^0$ -мезон массой  $2,4 \cdot 10^{-28}$  кг распадается на два  $\gamma$ -кванта. Найдите модуль импульса одного из образовавшихся  $\gamma$ -квантов в системе отсчета, где первичный  $\pi^0$ -мезон покоится.

**Решение**

$$2h\nu = mc^2; \Rightarrow \varepsilon_\gamma = \frac{mc^2}{2}; \quad p_\gamma = \frac{\varepsilon_\gamma}{c} = \frac{mc}{2};$$

**B1.** Электрон, двигаясь в ускорителе, достигает скорости, приближающейся к скорости света. Что при этом происходило с его импульсом и полной энергией? Для каждой величины определите соответствующий характер ее изменения:

- 1) не изменялась
- 2) увеличивалась
- 3) уменьшалась

**Решение**

1. Импульс электрона:

$$\vec{p} = m\vec{v} = \frac{m_0\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad \text{при } v \rightarrow c, \quad |\vec{p}| \rightarrow \infty;$$

2. Энергия электрона:

$$E = m_0c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right); \quad \text{при } v \rightarrow c; \quad E \rightarrow \infty;$$

Импульс электрона	Полная энергия электрона
<b>2</b>	<b>2</b>

## 6. Квантовая физика

### 6.1. Фотонная теория света

#### Гипотеза М. Планка о квантах

**A1.** Какого цвета мы видим абсолютно черное тело?

- 1) черного
- 2) красного
- 3) фиолетового
- 4) любого цвета в зависимости от температуры этого тела

#### Решение

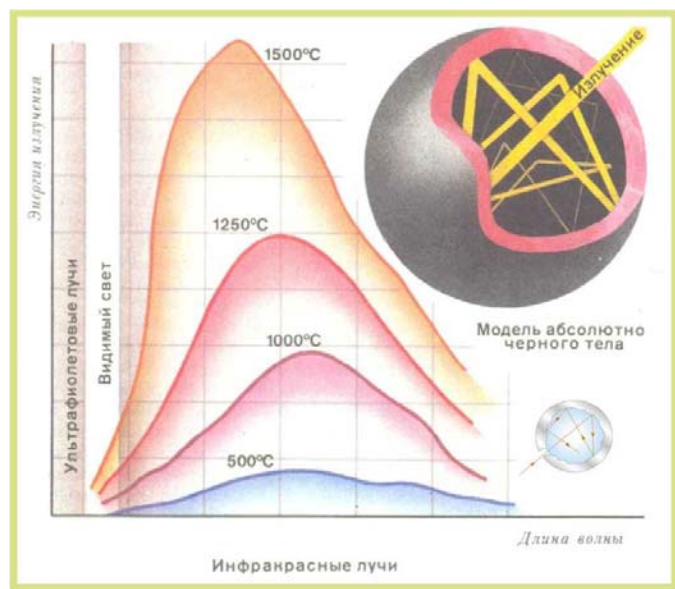
1. Принято считать, что теоретические исследования теплового излучения начались работами Кирхгофа в 1859 г. после открытия им закона теплового излучения. Именно Кирхгоф предложил концепцию абсолютно-чёрного тела и описал его модель. Оказалось, что тепловое излучение является наиболее распространённым видом электромагнитных волн.

2. **Тепловое излучение является следствием уменьшения внутренней энергии тела и наблюдается при любой температуре отличной от  $0^{\circ}\text{K}$ .**

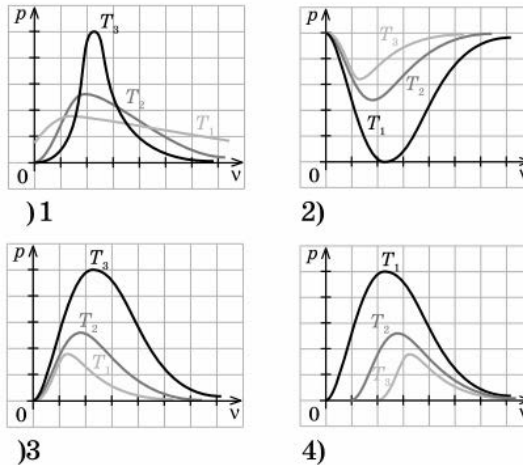
3. Следуя закону сохранения энергии, тепловое излучение должно приводить к уменьшению внутренней энергии, т.е. к охлаждению излучающего тела, если к нему не подводится энергия извне.

4. При поглощении телом электромагнитных волн его внутренняя энергия возрастает, что приводит к увеличению температуры. Постоянное испускание и поглощение электромагнитной энергии приводит к тому, что устанавливается динамическое равновесие между двумя этими процессами.

5. Цветовое содержание абсолютно чёрного тела зависит исключительно от температуры, при которой это тело находится.



**A2.** Были исследованы спектры теплового излучения при трех различных температурах ( $T_3 > T_2 > T_1$ ). Какой из графиков зависимости мощности излучения от частоты соответствует результатам наблюдения?



### Решение

1. Излучение удобно характеризовать его энергией  $W$  и потоком излучения  $\Phi_e$ , который определяется энергией, излучаемый за единицу времени

$$\Phi_e = \frac{W}{\tau},$$

2. Чтобы сравнивать излучающие способности тел различной площади вводят понятие **энергетической светимости**  $R_e$ , которая определяется как отношение потока излучения к площади излучающей поверхности

$$R_e = \frac{\Phi_e}{S}, \left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

Приведенные выше характеристики являются по сути своей интегральными, по ним невозможно судить о спектральном составе излучения. В этой связи, в рассмотрение вводится ещё одна величина – **спектральная плотность энергетической светимости**  $r_\lambda$  или  $r_\omega$ , которую иногда называют лучеиспускательной способностью. Спектральная плотность представляет собой отношение энергетической светимости  $dR_e$  к ширине волнового или частотного диапазона

$$r_{\lambda,T} = \frac{dR_e}{d\lambda}.$$

3. Энергетическая светимость в таком случае может быть определена интегралом

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda,T} d\lambda.$$

4. Из повседневного опыта известно, что если нагревать твердое тело, то оно вначале краснеет, а с повышением температуры свечение тела становится все более белым. Это свидетельствует о том, что максимум интенсивности теплового излучения по мере повышения температуры тела смещается к фиолетовому концу спектра, т.е. к его коротковолновой части. Длина волны  $\lambda_{\max}$  в спектре излучения абсолютно черного тела, на которую приходится максимум спектральной плотности энергетической светимости, определяется **законом смещения Вина:**

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где постоянная Вина  $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ .

5. Австрийский физик И. Стефан, анализирувавший полученные экспериментальные данные, и Л. Больцман, исходящий из общих термодинамических сообра-

жений, установили зависимость энергетической светимости черного тела от температуры. Согласно **закону Стефана – Больцмана**.

$$R_e = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4,$$

т.е. энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его термодинамической температуры. Коэффициент пропорциональности  $\sigma$  называется постоянной Стефана – Больцмана  $\sigma = 5,6 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ .

Введём далее пространственную характеристику излучения – **плотность энергии излучения**, т.е. количество излучённой телом энергии в единице объёма

$$u = \int_0^{\infty} u_{\omega} d\omega = \int_0^{\infty} u_{\lambda} d\lambda,$$

где величины  $u_{\omega} d\omega$  и  $u_{\lambda} d\lambda$  являются объёмной плотностью энергии, приходящейся на интервал циклических частот от  $\omega$  до  $\omega + d\omega$  или диапазон длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ , величины  $u_{\omega}$  и  $u_{\lambda}$  называются спектральными плотностями лучистой энергии. Если анализу подлежит один и тот же диапазон излучения, то  $u_{\lambda} d\lambda = u_{\omega} d\omega$ .

Так как

$$\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}, \Rightarrow \frac{d\lambda}{\lambda} = -\frac{d\omega}{\omega},$$

знак минус, в данном случае, означает, что с ростом частоты длина волны уменьшается. Считая величины  $d\lambda$  и  $d\omega$  положительными можно записать следующие соотношения

$$u_{\lambda} = \frac{\omega}{\lambda} u_{\omega}; \quad u_{\omega} = \frac{\lambda}{\omega} u_{\lambda}.$$

6. Исторически так сложилось, что теоретики имеют обыкновение пользоваться величиной  $u_{\omega}$ , а экспериментаторы предпочитают –  $u_{\lambda}$ , что, в общем-то, на суть рассматриваемых вопросов влияния не оказывает. Основной задачей теории теплового излучения являлось определение зависимости величины плотности энергии излучения от частоты или длины волны при различных температурах.

7. Теоретическое определение функции  $u_{\omega}(\omega, T)$  в рамках классической волновой теории было выполнено в 1900 г. **лордом Рэлеем**, а затем развито **Джинсом**. Эти знаменитые волновики применили к излучению абсолютно-чёрного тела теорему классической статистической механики о равномерном распределении кинетической энергии по степеням свободы. На каждую степень свободы, в соответствие с этой теоремой, приходится в среднем кинетическая энергия

$$\varphi = \frac{1}{2} k_B T,$$

где  $k_B \approx 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана. Если рассматриваются колебательные степени свободы, то необходимо учитывать и потенциальную энергию, обусловленную действием квазиупругой силы. На каждую колебательную степень свободы, таким образом, приходится энергия

$$\varphi = k_B T.$$

8. Таким образом в классическом представлении задача об излучении сводилась к определению функции  $u_{\lambda}(\lambda, T)$  или  $u_{\omega}(\omega, T)$ , что было возможным при правильном определении числа степеней свободы колеблющихся электронов.

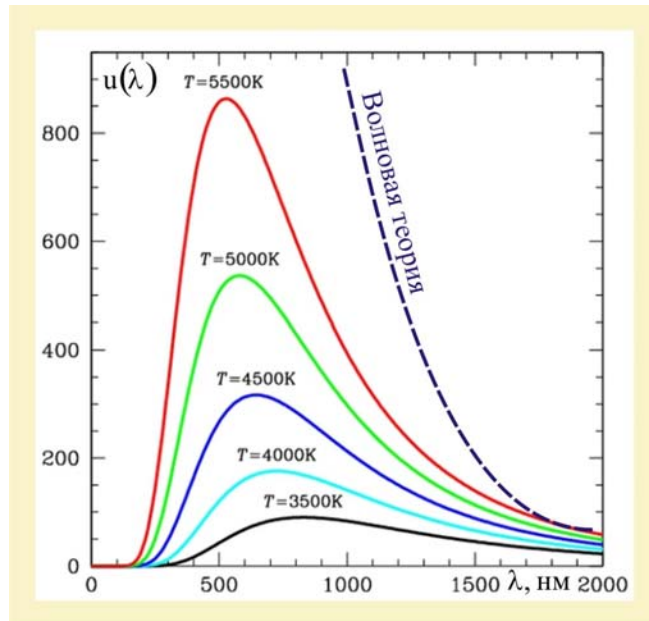
**Формула Рэлея – Джинса**, полученная на основании волновых представлений, имела вид

$$u_\lambda = \frac{k_B T}{\pi^2 c^3} \int_0^\infty \lambda^2 d\lambda = \infty.$$

9. Вид функции  $u_\lambda$  показан на рис. пунктирной линией. По теории знаменитых специалистов в волновой механике получалось, что **тепловое равновесие между веществом и излучением невозможно**.

10. Приравнивание в возможностях всех степеней свободы приводило к тому, что вся энергия излучения абсолютно-чёрного тела должна была концентрироваться в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

11. Эренфест это назвал **ультрафиолетовой катастрофой**. Дело в том, что по теории Рэля – Джинса излучение в полости имеет бесконечное число степеней свободы, а вещество вполне конечное.



Спектр излучения абсолютно-чёрного тела

12. Спектроскопические экспериментальные исследования излучения абсолютно-чёрного тела выявили совершенно отличные от теоретического вида функции  $u(\lambda, T)$ , на рис. они показаны сплошными цветными линиями, соответствующими различным температурам излучающего тела от  $T = 3500 \text{ }^\circ\text{K}$  до  $T = 5500 \text{ }^\circ\text{K}$ . Почувствуйте, как говорится, разницу между правдивым экспериментом и надуманной теорией.

13. Когда задачу об излучении абсолютно чёрного тела поручили решать юному **Максу Планку**, желавшему попробовать свои силы в теоретической физике, то он тоже решил применить теорему об энергетической равнозначности степеней свободы. Но Планк был более математик, чем физик и по первости решил поступить бесхитростно, чисто по студенчески. Он проанализировал поведение простейшего гармонического осциллятора, квазиупруго связанного с ядром электрона, находящегося в полости с равновесным излучением. При действии хаотически меняющегося электромагнитного поля электрон должен совершать колебания с хаотически меняющимися амплитудами и фазами, излучая и поглощая энергию электромагнитных волн.

14. Энергия такого осциллятора тоже должна совершать беспорядочные флуктуации вокруг среднего значения  $\langle \varepsilon \rangle$ . У Планка получилось уравнение, идеологически совпадающее с формулой Рэля – Джинса

$$u_\omega = \frac{\langle \varepsilon \rangle}{\pi^2 c^3} \omega^2.$$

15. Убедившись в бесперспективности традиционных подходов, Планк, не забываясь о физическом смысле, **начал подгонять формулу излучения под данные эксперимента**. Получились уравнения для классической физики довольно странноватого вида:

$$u_\omega = \frac{\hbar \omega^3}{\pi^2 c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar \omega}{k_B T} - 1\right)}.$$

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T} - 1\right)}.$$

16. Странность этого уравнение заключалась в том, что оно содержало некую постоянную величину  $\hbar = h/2\pi \approx 1 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, ( $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с). **Это означало, что обычный гармонический осциллятор мог излучать энергию только порциями.**

17. Позже Планк нашёл теоретическое обоснование своему уравнению. Он высказал гипотезу о том, что электромагнитная энергия излучается и поглощается не непрерывно, а порциями, названными квантами.

18 Согласно этой гипотезе энергия гармонического осциллятора могла принимать только фиксированные значения, отличающиеся на величину

$$\varepsilon_f = hf \equiv h\nu.$$

где  $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $f$ ,  $\nu$  – частота. Таким образом, обмен энергией резонирующего электрона происходит порциями  $\langle \varepsilon \rangle = h\nu$ , т.е. квантовыми скачками. Такое смелое утверждение требовало совершенно по новому объяснить связь между излучаемой энергией и колебаниями осциллятора, в частности электрона на резерфордовской орбите.

19. Возможны два варианта. Во-первых, можно предположить, что резонатор во время колебаний вообще не излучает энергии, а только в некоторый момент времени генерирует электромагнитную волну частотой  $\nu$ , в этом случае закон сохранения энергии для излучающих атомных структур не выполняется, во-вторых, можно допустить что существуют определённые уровни энергии (разрешённые уровни) на которых может присутствовать электрон и при перескоках с одного энергетического уровня на другой происходит излучение энергии. Вторая точка зрения оказалась прагматичней и в дальнейшем она нашла теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение.

20. Таким образом, наиболее достоверным является график 3.

**А3.** Одна десятая часть монохроматического света источника мощностью  $P$  падает на тело черного цвета массой  $m$ , изготовленного из материала с удельной теплоемкостью  $c$ . Частота излучения  $\nu$ . На сколько градусов нагреется тело за время  $t$ , если считать, что свет поглощается полностью, и пренебречь теплоотводом от него.

1)  $\frac{h\nu}{10cm}$       2)  $\frac{Pt}{10cm}$       3)  $\frac{10cmt}{P}$       4)  $\frac{10Pt}{h\nu cm}$

**Решение**

$$\frac{P\tau}{10} = cm\Delta T; \Rightarrow \Delta T = \frac{P\tau}{10cm};$$

### Фотоэффект. опыты А.Г. Столетова

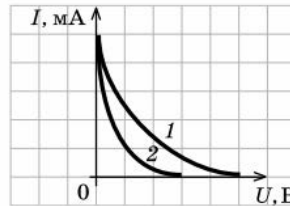
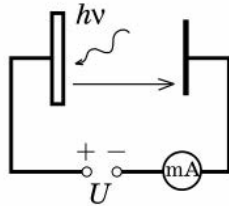
**А4.** При уменьшении угла падения  $\alpha$  на плоский фотокатод монохроматического излучения с неизменной длиной волны  $\lambda$  максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов

- 1) возрастает
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется
- 4) возрастает при  $\lambda > 500$  нм и уменьшается при  $\lambda < 500$  нм

**Решение**

$$h\nu = \frac{m_e v_m^2}{2} + A; \Rightarrow K_{\max} = \varepsilon_f - A; \Rightarrow K_{\max} \neq f(\alpha);$$

**А5.** Было проведено два эксперимента по измерению зависимости фототока от приложенного напряжения между фотокатодом и анодом. В этих экспериментах металлическая пластинка фотокатода освещалась пучком монохроматического света. Какое из утверждений верно?



- 1) Обе зависимости получены для световых пучков с одной длиной волны с одинаковой интенсивностью.
- 2) Обе зависимости получены для световых пучков с одной длиной волны, но у первого интенсивность света больше.
- 3) Обе зависимости получены для пучков с одинаковой интенсивностью, но длина волны у первого больше.
- 4) Обе зависимости получены для пучков с одинаковой интенсивностью, но длина волны  $\nu$  первого меньше.

**Решение**

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = eU + A; \quad U = \frac{h}{\lambda} - A; \quad \left. \begin{array}{l} U_1 \approx 5 \text{ В}; \\ U_2 \approx 3 \text{ В}; \end{array} \right\} \Rightarrow \varepsilon_{f(1)} > \varepsilon_{f(2)}; \quad \lambda_2 < \lambda_1;$$

**А6.** Если скорость фотоэлектронов, выбиваемых светом с поверхности катода, при увеличении частоты света увеличивается в 3 раза, то задерживающая разность потенциалов (запирающий потенциал) в установке по изучению фотоэффекта должна

- 1) увеличиться в 9 раз
- 2) уменьшиться в 9 раз
- 3) увеличиться в 3 раза
- 4) уменьшиться в 3 раза

**Решение**

$$\frac{m_e v_{\max}^2}{2} = eU; \Rightarrow U \sim v_{\max}^2;$$

**С1.** При облучении катода светом частотой  $\nu = 1,2 \cdot 10^{15}$  Гц фототок прекращается при приложении между анодом и катодом напряжения  $U = 1,65$  В. Чему равна частота  $\nu_0$ , соответствующая красной границе фотоэффекта для вещества фотокатода?



### Решение

1. Работа выхода материала фотокатода:

$$h\nu = eU + A; \quad A = h\nu - eU;$$

2. Красная граница фотоэффекта для данного вещества фотокатода:

$$A = h\nu_0; \quad \Rightarrow \quad \nu_0 = \frac{A}{h} = \frac{h\nu - eU}{h} = \nu - \frac{eU}{h};$$

$$\nu_0 = 1,2 \cdot 10^{15} - \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,65}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 8 \cdot 10^{14} \text{ Гц};$$

---

**С2.** Фотокатод облучают светом, длина волны которого  $\lambda = 300$  нм. Красная граница фотоэффекта для вещества фотокатода  $\lambda_0 = 400$  нм. Какое напряжение нужно приложить между анодом и катодом, чтобы фототок прекратился?

### Решение

$$\frac{hc}{\lambda} = eU + A; \quad A = \frac{hc}{\lambda_0}; \quad \Rightarrow \quad \frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_0} = eU;$$

$$U = \frac{hc}{e} \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda \lambda_0} \right) \approx \frac{2 \cdot 10^{-25}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \left( \frac{4 - 3}{12} \cdot 10^5 \right) \approx 1,04 \text{ В}$$

---

**С3.** В вакууме находятся два покрытых кальцием электрода, один из которых заземлен. К ним подключен конденсатор емкостью  $C_1 = 10\,000$  пФ. При длительном освещении катода светом фототок, возникший вначале, прекращается, а на конденсаторе появляется заряд  $q = 10^{-8}$  Кл. Работа выхода электронов из кальция  $A = 4,42 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определите длину волны света, освещающего катод.

### Решение

$$\frac{hc}{\lambda} = eU + A; \quad U = \frac{q}{C}; \quad \Rightarrow \quad \frac{hc}{\lambda} = \frac{eq}{C} + A; \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{hc}{A + \frac{eq}{C}};$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot 10^{-25}}{4,42 \cdot 10^{-19} + \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-8}}{10^{-8}}} \approx 3,33 \cdot 10^{-7} \text{ м};$$

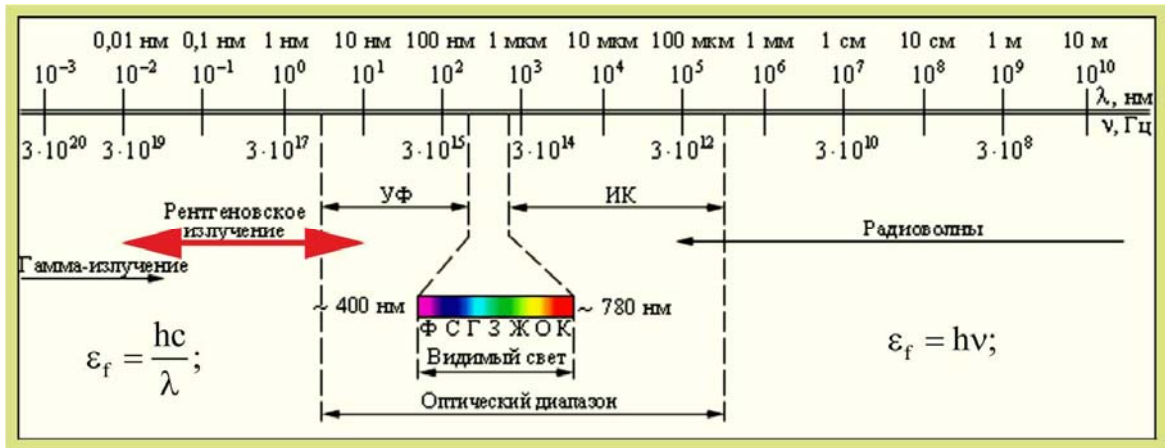
---

### Фотоны. Энергия и импульс фотона

**A7.** Импульс фотона имеет минимальное значение в диапазоне частот

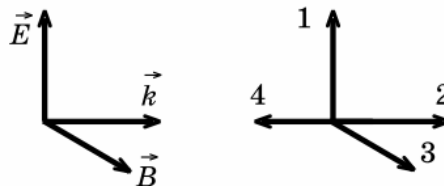
- 1) инфракрасного излучения
- 2) видимого излучения
- 3) ультрафиолетового излучения
- 4) рентгеновского излучения

### Решение

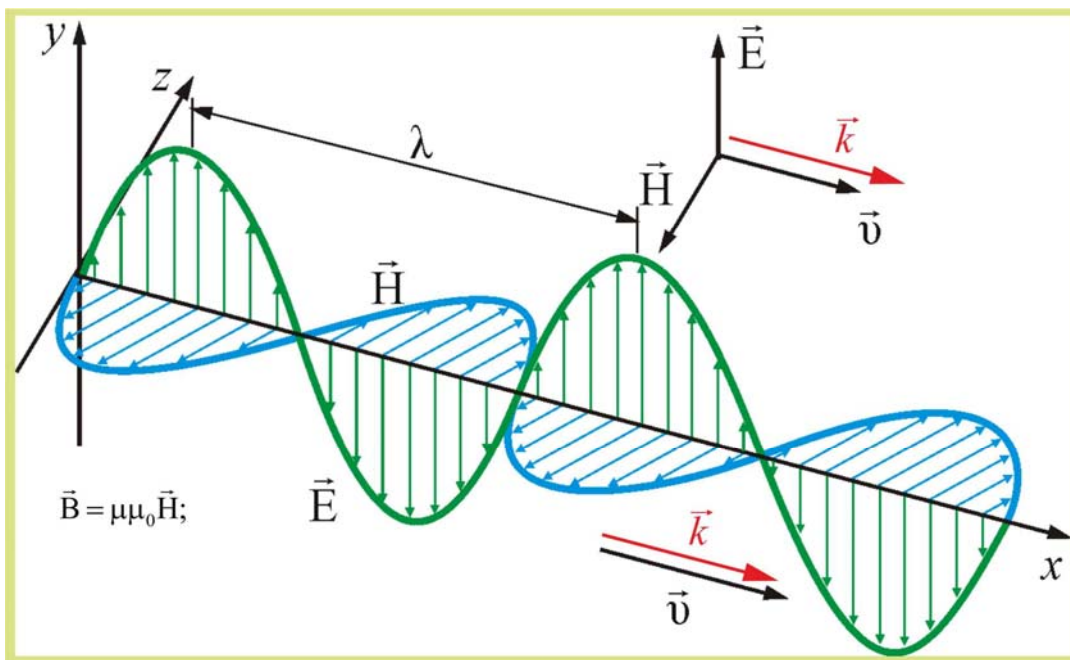


A8. На рисунке показано взаимное расположение векторов напряженности электрического поля  $\vec{E}$  и магнитной индукции  $\vec{B}$  в электромагнитной волне. Вектор  $\vec{k}$  указывает направление распространения волны. Какая из стрелок 1, 2, 3 или 4 указывает направление импульса фотона этого излучения?

- 1) стрелка 1
- 2) стрелка 2
- 3) стрелка 3
- 4) стрелка 4



### Решение



**A9.** Два источника света излучают волны, длина волны которых  $\lambda_1 = 4 \cdot 10^{-7}$  и  $\lambda_2 = 8 \cdot 10^{-7}$  м. Чему равно отношение импульсов  $\frac{p_1}{p_2}$  фотонов, излучаемых первым и вторым источниками?

- 1)  $\frac{1}{4}$                       2)  $\frac{1}{2}$                       3)  $\frac{1}{2}$                       4)  $\frac{1}{4}$

**Решение**

$$\varepsilon_f = \frac{hc}{\lambda}; \quad p_f = \frac{\varepsilon_f}{c} = \frac{h}{\lambda}; \quad \Rightarrow \quad \left. \begin{array}{l} p_{f(1)} = \frac{h}{\lambda_1}; \\ p_{f(2)} = \frac{h}{\lambda_2}; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{p_{f(1)}}{p_{f(2)}} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 2;$$

**A10.** Импульс фотона с энергией 5 эВ равен

- 1)  $1,7 \cdot 10^{-8}$  кг · м/с  
 2)  $2,4 \cdot 10^{-10}$  кг · м/с  
 3)  $2,7 \cdot 10^{-27}$  кг · м/с  
 4)  $1,6 \cdot 10^{-43}$  кг · м/с

**Решение**

$$p_f = \frac{\varepsilon_f}{c} = \frac{5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{3 \cdot 10^8} \approx 2,67 \cdot 10^{-27} \text{ Дж};$$

**C4.** Для разгона космических аппаратов и коррекции их орбит предложено использовать солнечный парус — скрепленный с аппаратом легкий экран большой площади из тонкой пленки, которая зеркально отражает солнечный свет. Чему равно добавочное изменение скорости космического аппарата массой 1000 кг (включая массу паруса) за 24 часа, если размеры паруса  $200 \text{ м} \times 200 \text{ м}$ ? Мощность  $W$  солнечного излучения, падающего на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, составляет  $1370 \text{ Вт/м}^2$ .

**Решение**

1. Второй закон Ньютона:

$$F = ma = \frac{mdv}{dt} = \frac{d(mv)}{dt}; \quad \vec{F} = N \frac{|\Delta \vec{p}|}{\Delta t};$$

2. Изменение импульса фотона при встрече с парусом:

$$|\Delta \vec{p}_f| = 2p_f = \frac{2hv}{c}; \quad \Rightarrow \quad F = N \frac{\frac{2hv}{c}}{\Delta t} = \frac{2WS}{c};$$

3. Ускорение корабля:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2WS}{mc};$$

4. Скорость корабля:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}; \quad (v - v_0) = at; \quad v_0 = 0; \quad v = \frac{2WS\tau}{cm} = \frac{2 \cdot 1370 \cdot 4 \cdot 10^4 \cdot 24 \cdot 3600}{3 \cdot 10^8 \cdot 10^3} \approx 31,6 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

### Уравнение Эйнштейна для фотоэффекта

**A11.** Кинетическая энергия фотоэлектрона, вылетевшего с поверхности металла под действием фотона, равна  $E$ . Энергия этого фотона, поглощенного при фотоэффекте

- 1) больше  $E$
- 2) меньше  $E$
- 3) равна  $E$
- 4) может быть больше или меньше  $E$  в зависимости от условий

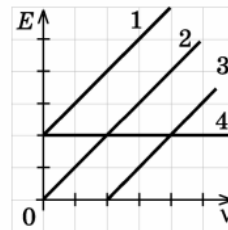
**Решение**

$$h\nu = \varepsilon_f = K_{\max} + A; \quad K_{\max} = \varepsilon_f - A < h\nu;$$

**A12.** Какой график соответствует зависимости максимальной кинетической энергии фотоэлектронов  $E$  от частоты  $\nu$  падающих на вещество фотонов при фотоэффекте (рис.)?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

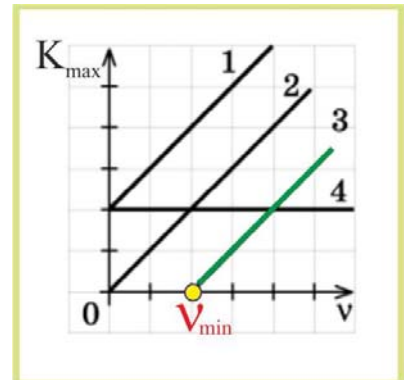
Ответ:



**Решение**

$$h\nu = \frac{m_e v_{\max}^2}{2} + A; \Rightarrow K_{\max} = h\nu - A; \Rightarrow \text{график - 3}$$

при  $h\nu = A, K_{\max} = 0; \quad \nu_{\min} = \frac{A}{h};$



**A13.** При освещении катода вакуумного фотоэлемента потоком монохроматического света происходит освобождение фотоэлектронов. Как изменится максимальная энергия вылетевших фотоэлектронов при увеличении частоты падающего света в 3 раза?

- 1) увеличится в 3 раза
- 2) не изменится
- 3) увеличится более чем в 3 раза
- 4) увеличится менее чем в 3 раза

**Решение**

$$\left. \begin{array}{l} h\nu_1 = K_{\max(1)} + A; \\ 3h\nu_1 = K_{\max(2)} + A; \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} K_{\max(2)} = 3h\nu_1 - A; \\ K_{\max(1)} = h\nu_1 - A; \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{K_{\max(2)}}{K_{\max(1)}} < 3;$$

- В1.** На пластину из никеля падает электромагнитное излучение, энергия фотонов которого равна 9 эВ. При этом в результате фотоэффекта из пластины вылетают электроны с максимальной энергией 4 эВ. Чему равна работа выхода электронов из никеля?

**Решение**

$$\varepsilon_f = K_{\max} - A; \quad A = \varepsilon_f - K_{\max} = 9 - 4 = 5 \text{ эВ} = 8 \cdot 10^{-19} \text{ Дж};$$


---

- С5.** Фотокатод, покрытый кальцием (работа выхода  $A = 4,42 \cdot 10^{-19}$  Дж), освещается светом частотой  $\nu = 2 \cdot 10^{15}$  Гц. Вылетевшие из катода электроны попадают в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям индукции этого поля и движутся по окружности, у которой максимальный радиус  $R = 10$  мм. Чему равна индукция магнитного поля  $B$ ?

**Решение**

1. Квадрат максимальной скорости фотоэлектронов, покидающих фотокатод:

$$h\nu = \frac{m_e v_m^2}{2} + A; \quad v_m^2 = \frac{2(h\nu - A)}{m_e};$$

2. Условие нахождения электрона на круговой стационарной орбите в магнитном поле:

$$evB = \frac{m_e v_m^2}{R}; \quad B = \frac{m_e v_m}{eR} = \frac{m_e}{eR} \sqrt{\frac{2(h\nu - A)}{m_e}} = \sqrt{\frac{2m_e(h\nu - A)}{e^2 R^2}};$$

$$B = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} (6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 2 \cdot 10^{15} - 4,42 \cdot 10^{-19})}{2,56 \cdot 10^{-38} \cdot 10^{-4}}} \approx 7,93 \cdot 10^{-4} \text{ Тл} \approx 0,8 \text{ мТл};$$


---

- С6.** При облучении металлической пластинки фотоэффект имеет место только в том случае, если импульс  $p$  падающих на нее фотонов превышает  $3,6 \cdot 10^{-27}$  кг · м/с. С какой скоростью будут покидать пластинку электроны, если облучать ее светом, частота которого вдвое больше?

**Решение**

1. Работа выхода материала пластины:

$$A = \frac{hc}{\lambda_0} \approx p_{f(0)} c \approx 3,6 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^8 \approx 1,1 \cdot 10^{-18} \text{ Дж};$$

3. Скорость фотоэлектронов:

$$2p_{f(0)} = \frac{m_e v_{\max}^2}{2} + A; \quad \Rightarrow \quad v_{\max} = \sqrt{\frac{4p_{f(0)} c - 2A}{m_e}};$$

$$v_{\max} \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 3,6 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^8 - 2,2 \cdot 10^{-18}}{9,11 \cdot 10^{-31}}} \approx 1,53 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 1530 \frac{\text{км}}{\text{с}};$$


---

- С7.** Фотоны, имеющие энергию 6 эВ, выбивают электроны с поверхности металла. Работа выхода электронов из металла равна 5,7 эВ. Какой импульс приобретает электрон при вылете с поверхности металла?

**Решение**

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов:

$$K_m = \varepsilon_f - A = (6 - 5,7)1,6 \cdot 10^{-19} \approx 4,8 \cdot 10^{-20} \text{ Дж};$$

2. Максимальная скорость фотоэлектронов:

$$K_m = \frac{m_e v_m^2}{2}; \Rightarrow v_m = \sqrt{\frac{2K_m}{m_e}};$$

3. Максимальное значение модуля импульса фотоэлектронов:

$$p_m = m_e v_m = \sqrt{2m_e K_m} \approx \sqrt{18 \cdot 10^{-31} \cdot 4,8 \cdot 10^{-20}} \approx 3 \cdot 10^{-25} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}};$$


---

- С8.** Чему равна длина волны  $\lambda_h$ , соответствующая красной границе фотоэффекта, если при облучении металлической пластинки светом длиной волны  $\lambda = 3,3 \cdot 10^{-7}$  м максимальная скорость выбиваемых электронов составляет 800 км/с?

**Решение**

$$\varepsilon_f = K_m + A; \quad A = \frac{hc}{\lambda_0};$$

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{mv^2}{2} + \frac{hc}{\lambda_0}; \Rightarrow \lambda_0 = \frac{\lambda}{1 - \frac{mv^2}{2} \frac{\lambda}{hc}};$$

$$\lambda_0 \approx \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{1 - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 64 \cdot 10^{10}}{2} \cdot \frac{3,3 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-25}}} \approx 635 \text{ нм};$$


---

- С9.** Фотоэффект у данного металла начинается при частоте излучения  $\nu_0 = 6 \cdot 10^{14}$  Гц. Найдите частоту падающего света, если вылетающие с поверхности металла фотоэлектроны полностью задерживаются сеткой, потенциал которой относительно металла составляет  $U = 4$ В.

**Решение**

$$\varepsilon_f = K_m + A; \quad K_m = \frac{mv_m^2}{2} = eU; \quad A = \frac{hc}{\lambda_0} = h\nu_0;$$

$$h\nu = eU + h\nu_0; \Rightarrow \nu = \frac{eU}{h} + \nu_0 \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4}{6,63 \cdot 10^{-34}} + 6 \cdot 10^{14} \approx 1,57 \cdot 10^{15} \text{ Гц};$$


---

**Корпускулярно-волновой дуализм.  
Дифракция электронов**

**A14.** Сравните длины волн де Бройля для электрона, протона и  $\alpha$ -частицы, движущихся с одной и той же скоростью.

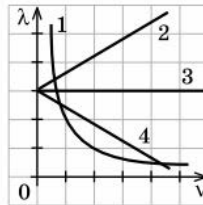
- 1)  $\lambda_e > \lambda_p > \lambda_\alpha$
- 2)  $\lambda_e < \lambda_p < \lambda_\alpha$
- 3)  $\lambda_e > \lambda_p < \lambda_\alpha$
- 4)  $\lambda_e = \lambda_p = \lambda_\alpha$

**Решение**

$$\lambda_B = \frac{h}{mv}; \quad v = \text{const}; \quad m_\alpha > m_p > m_e; \quad \Rightarrow \quad \lambda_e > \lambda_p > \lambda_\alpha;$$


---

**A15.** На каком из графиков правильно показана зависимость длины волны де Бройля электрона от его скорости?



- 1) 1                      2) 2                      3) 3                      4) 4

**Решение**

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v}; \quad \Rightarrow \quad \lambda_e \sim \frac{1}{v} \quad \Rightarrow \quad \text{правильная зависимость 1;}$$


---

**A16.** При увеличении и массы, и скорости частицы в 2 раза длина волны де Бройля

- 1) увеличится в 2 раза
- 2) увеличится в 4 раза
- 3) уменьшится в 2 раза
- 4) уменьшится в 4 раза

**Решение**

$$\lambda_1 = \frac{h}{mv}; \quad \lambda_2 = \frac{h}{4mv}; \quad \Rightarrow \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{1}{4};$$


---

**A17.** Чему равна длина волны де Бройля для частицы, обладающей импульсом  $100 \text{ кг} \cdot \text{м/с}$ ?

- 1)  $6,6 \cdot 10^{-36} \text{ м}$
- 2)  $6,6 \cdot 10^{-32} \text{ м}$
- 3)  $9,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
- 4)  $1,5 \cdot 10^{35} \text{ м}$

**Решение**

$$\lambda_B = \frac{h}{p} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{10^2} \approx 6,63 \cdot 10^{-26} \text{ м};$$

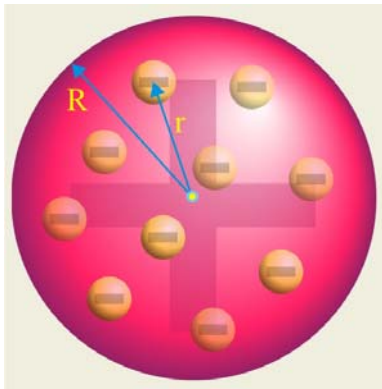

---

## 6.2. Боровская модель атома

### Опыты по рассеянию альфа-частиц. Планетарная модель атома

- A1.** В опыте Резерфорда  $\alpha$ -частицы рассеиваются
- 1) электростатическим полем ядра атома
  - 2) электронной оболочкой атомов мишени
  - 3) гравитационным полем ядра атома
  - 4) поверхностью мишени

#### Решение



Модель атома Томсона

1. В 1903 г. Томсон обнаружил свою модель атома, который представлял собой положительно заряженную сферу, в которой симметрично были расположены электроны.

2. Спектры испускания Томсон объяснял тем обстоятельством, что электроны, удерживаемые в атоме квазиупругой электростатической силой, могли совершать вблизи положения равновесия гармонические колебания на соответствующих частотах.

Если атом представить в виде заряженной сферы, то напряжённость электрического поля внутри определится уравнением, которое для рассматриваемого случая может быть записано в виде

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^3} r \quad (0 \leq r \leq R),$$

где  $q$  – заряд сферы,  $R$  – радиус сферы,  $r$  – текущий радиус. На электрон, расположенный на удалении  $r$  от центра сферы будет действовать сила

$$F = (-q)E = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{R^3} r = -kr.$$

Будучи выведенным из состояния равновесия электрон станет совершать гармонические колебания на частоте

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m_e}} = \sqrt{\frac{e^2}{m_e R^3}},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – масса электрона,  $R$  – радиус атома. Последнее уравнение позволяет определить радиус атома

$$R = \sqrt[3]{\frac{e^2}{m_e \omega^2}}.$$

При длине волны спектральной линии  $\lambda \approx 6 \cdot 10^{-7}$  м (0,6 мкм), т.е. в видимой области спектра, что соответствует циклической частоте колебаний  $\omega \approx 3 \cdot 10^{15}$  с<sup>-1</sup>, расчётный радиус атома определится как

$$R \approx \sqrt[3]{\frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{1 \cdot 10^{-30} (3 \cdot 10^{15})^2}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$



Полученное значение радиуса по порядку величины совпадает с молекулярно-кинетическими представлениями, что явилось для Томсона подтверждением правоты разработанной модели. Атом Томсона удовлетворял условию электрической нейтральности атома в обычном состоянии, количество положительного и отрицательного электричества в атомах было одинаковым.

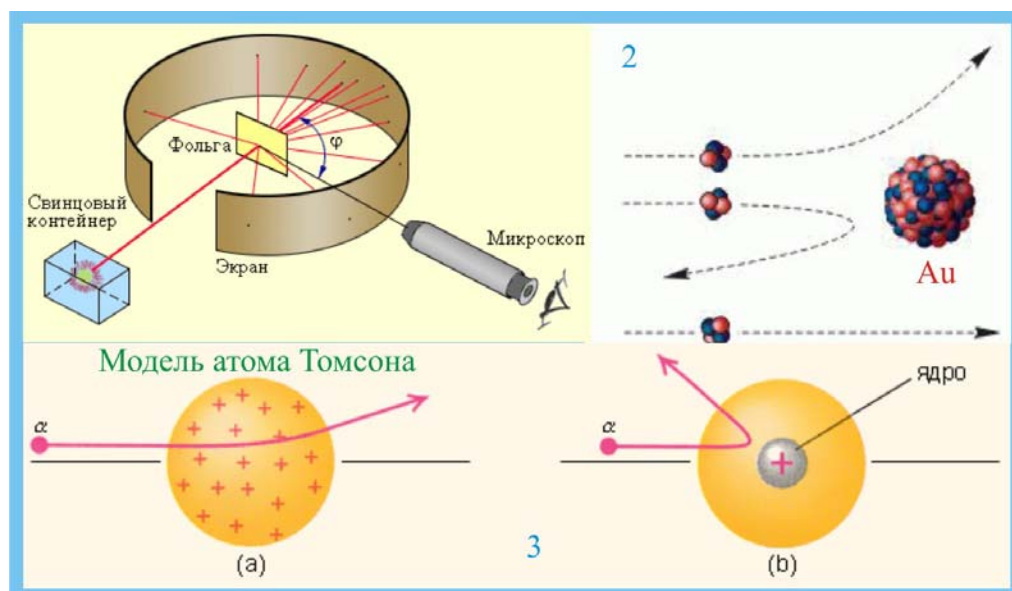
При силовом удалении и присоединении одного или нескольких электронов, атом превращается в положительный или отрицательный ион, который уже становится носителем заряда и может участвовать в процессах возникновения и протекания электрического тока.

Впервые о способностях атомов терять и присоединять электроны сообщал в своих работах Майкл Фарадей, он же ввёл и термин «ион», происходящий от греческого «путешественник».

Резерфорд занялся исследованием положительно заряженных частиц, выбрасываемых радиоактивными веществами,  $\alpha$  – частицами.

В начале 1908 г. Резерфорд установил, что эти частицы представляют атомы гелия, лишённые 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.

3. На рис. (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.



Эксперименты Резерфорда с  $\alpha$  – частицами

4. 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.

5. 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. 1.5). Микроскоп с экраном совместно с корпусом камеры могли вращаться вокруг фольги, которая постоянно обстреливалась  $\alpha$  – частицами. Таким образом Резерфорд мог с 360 градусным обзором наблюдать рассеяние  $\alpha$  – частиц.

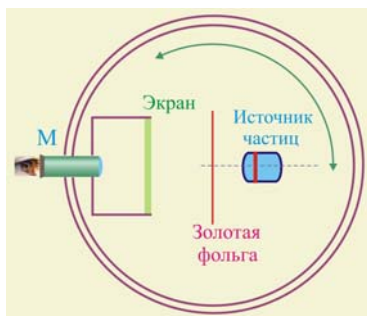


Рис. 7.5. Схема установки

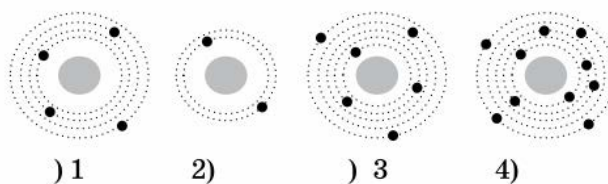
Если бы атом золота был таким как его представлял Томсон (фрагмент а), то  $\alpha$  – частицы должны были отклоняться на достаточно малые углы. Вращая детектор из сернистого цинка, исследователи могли измерять относительное число  $\alpha$  – частиц, рассеянных под различными углами  $\theta$

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, вне всяких тогдашних представлений, одна из 20 000 частиц, падающих на фольгу толщиной  $4 \cdot 10^{-7}$  м, возвращалась назад, в сторону источника.

6. Резерфорд по этому поводу писал: « Это было самое невероятное событие, с которым мне когда-либо приходилось 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».

**A2.** На рисунке изображены схемы четырех атомов. Черными точками обозначены электроны. Атому  $^{12}_6\text{C}$  соответствует схема



**Решение**

$$^{12}_6\text{C}; \Rightarrow Z = 6, A = 12; \Rightarrow N_e = 6, \text{ соответствует схема 3.}$$

**A3.** Электронная оболочка в нейтральном атоме фосфора  $^{31}_{15}\text{P}$  содержит

- 1) 46 электронов
- 2) 31 электрон
- 3) 16 электронов
- 4) 15 электронов

**Решение**

$$^{31}_{15}\text{P}; Z = 15; A = 31; \Rightarrow N_e = 15;$$

**A4.** В опытах Резерфорда по рассеянию  $\alpha$ -частиц при их прохождении через золотую фольгу было обнаружено, что только одна из примерно 8000 частиц отклоняется на углы, большие  $90^\circ$ . Какое объяснение дал Резерфорд этому экспериментальному факту?

- 1) Масса  $\alpha$ -частиц в несколько тысяч раз меньше массы ядра золота.
- 2) Скорость  $\alpha$ -частиц в тысячи раз меньше скорости электронов в атоме.
- 3) Площадь сечения ядра на несколько порядков меньше площади сечения атома.
- 4) Подавляющее большинство  $\alpha$ -частиц поглощается фольгой.

### Решение

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Действительно, длительные наблюдения Резерфорда и ассистентов показали, что в большинстве своём  $\alpha$  – частицы к удовольствию Томсона рассеиваются на достаточно малые углы, порядка  $1 - 3^\circ$ .

6. 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.

7. Фольга из платины демонстрировала те же тенденции, примерно каждая из 8000 частиц, отклонялась на углы более  $90^\circ$ .

8. Исследователям стало ясно, что случаи «нестандартного» рассеяния требуют пересмотра модели атома. Получалось, что летящая  $\alpha$  – частица время от времени встречала на своём пути нечто, локализованное в малом объёме и имеющее непременно положительный заряд.

9. Такая ситуация складывается при соударении одинаковых по размеру и шаров, когда массивный шар из свинца, например, покоится, а на него налетает лёгкий пластмассовый шарик.

10. При центральном ударе свинцовый шар имеет незначительное перемещение, а лёгкий шарик отбрасывается в сторону противоположную первоначальному на-

правлению. Редкость таких событий могла объясняться, что попадать в это «ничто» сложно, ввиду его малости в сравнении с размерами всего атома.

11. 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  $r \rightarrow 0$ ;  $F_k \rightarrow \infty$ .

12. 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.

13. Пусть  $\alpha$  – частица на большом от ядра расстоянии движется со скоростью  $v$ , направленной вдоль прямой. 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.

14. 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

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{r^2}.$$

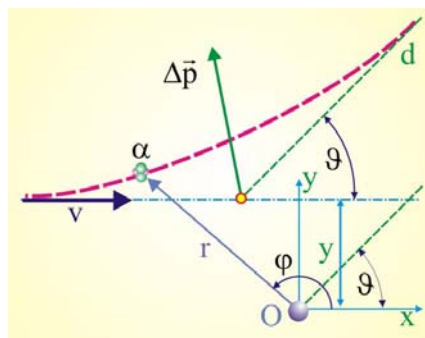
Естественно в этой связи предположить, что чем меньше прицельное расстояние  $y$ , тем на больший угол отклоняется  $\alpha$  – частица. Изменение импульса  $\alpha$  – частицы будет равно

$$|\Delta\vec{p}| = 2m_\alpha \sin \vartheta/2.$$

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 видно, что угол отклонения тем больше, чем меньше прицельное расстояние  $y$ . При малых прицельных расстояниях угол от-



Рассеяние  $\alpha$  – частиц

клонения может принимать значения  $\theta > \pi/2$ , т.е.  $\alpha$  – частица может оказаться в результате столкновения с атомом отброшенной назад.

15. 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.

$$W \sim \frac{1}{\sin^4(\vartheta/2)}.$$

16. 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  $\vartheta = 5^\circ$  приблизительно как  $1/10^5$ .

Полученные экспериментальные данные и проделанные вычисления послужили основанием для разработки планетарной модели атома.

17. 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

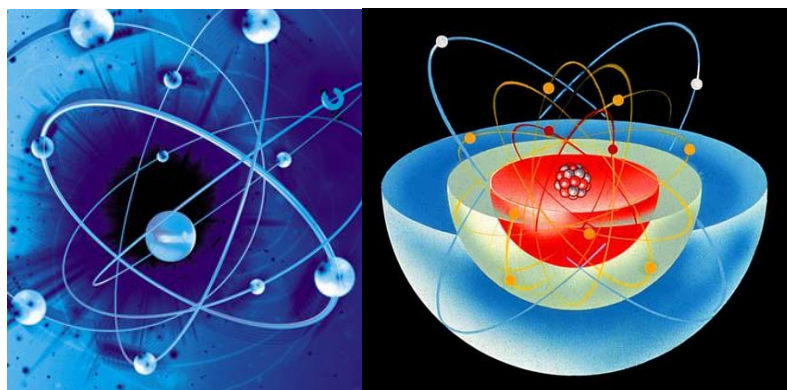
$$\frac{mv^2}{2} \approx \frac{Ze \cdot 2e}{4\pi\epsilon_0 y_0};$$

18. 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 изучения атомов.

19. Кстати, когда Резерфорд, соблюдая субординацию, рассказал о результатах экспериментов Томсону, то мэтр совсем не расстроился по поводу несостоятельности своей модели атома, похоже, что великий Томсон поставил перед Резерфордом задачу таким образом, чтобы подтвердить заранее известный ему одному ответ.

20. Когда стало очевидным, что во взаимодействии  $\alpha$  – частиц и ядер превалируют кулоновские силы, имеющие сходные с гравитационными силами, удерживающими планеты вокруг Солнца, то аналогия с планетной системой не преминула возникнуть.

21. 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.



*Планетарная модель атома Эрнста Резерфорда*



22. 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.

---

### Постулаты Бора

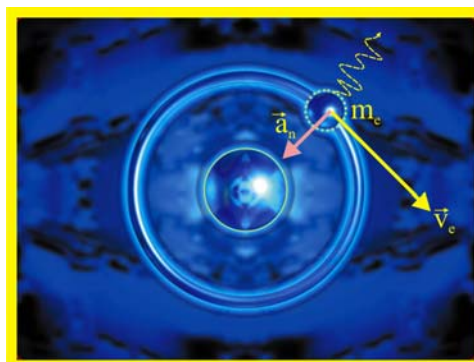
- А5.** Атом водорода находился в основном состоянии. При первом столкновении с другим атомом он перешел в возбужденное состояние, а при следующем столкновении был ионизирован. Энергия системы «ядро — электрон» имела
- 1) максимальное значение в нормальном состоянии атома
  - 2) максимальное значение в возбужденном состоянии атома
  - 3) максимальное значение в ионизированном состоянии атома
  - 4) одинаковое значение во всех трех состояниях

### Решение

Несмотря на то, что модель атома Резерфорда инициировала целый поток идей о строении атома и особенностях устройства электронных составляющих, этой модели были присущи принципиальные недостатки.

Наиболее наглядно это наблюдается на примере самого простого атома водорода, который по представлениям Резерфорда содержит на орбите один единственный электрон, компенсирующий положительный заряд ядра, равный по модулю заряду электрона.

Как уже отмечалось ранее, электрон, совершая вращение вокруг ядра по круговой или эллиптической орбите, ввиду специфики криволинейного движения обладает центростремительным ускорением  $a_n$  (рис. 8.4). В соответствии с классической электродинамикой такой ускоренно движущийся электрон неминуемо должен излучать электромагнитную волну, следовательно, движение его будет не круговым или эллиптическим, а спиралевидным, т.е. в конце концов, эта спираль должна закончиться на ядре.



*Атом водорода по Резерфорду*

Кроме того, модель атома Резерфорда не объясняла, почему атомы излучают только определённые частоты. Когда Резерфорд вершил судьбы мировой науки, поблизости, в статусе ученика обретался молодой датский студент Нильс Бор, которому все эти атомно-ядерные разговоры были чрезвычайно интересны.

Наслушавшись научных диспутов между Дж. Дж. Томсоном, Резерфордом и другими титанами физики и ознакомившись с работами Макса Планка, Нильс Бор заподозрил, что между квантовой гипотезой Планка и устройством атома должна быть

взаимосвязь, коль квантовая теория так убедительно работает на чёрном теле и фотоэффекте.

Бор подозревал, что квантовые представления могли объяснить стабильность атомов. Последовательность рассуждений Нильса Бора была примерно такова.

Для начала Бор предположил, что электрон, вопреки классической электродинамике, находясь на стационарной орбите, не излучает. Сила Кулона со стороны ядра

$$\vec{F}_k = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze \cdot e}{r^3} \vec{r},$$

удовлетворяет закону обратных квадратов, как и гравитационная сила Ньютона

$$\vec{F}_G = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r},$$

т.е. в классическом варианте задача о движении электрона аналогична задаче о движении планет вокруг Солнца, почему, собственно, Резерфорд и пришёл к планетарной модели атома. Потенциальная энергия, обусловленная силой Кулона, определяется как

$$\Pi(r) = -\frac{Ze^2}{r},$$

где  $Ze$  – заряд ядра, принятый Бором как материальная точка. Нормальное ускорение электрона (рис. 3.48) при линейной скорости движения  $v$  равно

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

Условие нахождения электрона на стационарной орбите запишется в виде равенства силы Кулона и силы инерции, так же как при рассмотрении планет, вращающихся вокруг Солнца, с той разницей, что гравитационная сила заменяется силой Кулона

$$\frac{m_e v^2}{r} = k \frac{Ze^2}{r^2}; \Rightarrow m_e v^2 = \frac{Ze^2}{r}.$$

Далее было записано уравнение для суммарной энергии электрона на орбите

$$W = \frac{m_e v^2}{2} + \Pi(r) = -\frac{Ze^2}{2r},$$

уравнение угловой скорости

$$\omega = \frac{v}{r},$$

и кинетического момента, направленного перпендикулярно плоскости движения электрона

$$L = m_e v r.$$

Таким образом, движение электрона описывалось пятью переменными  $\{r, v, W, \omega, L\}$ , которые связаны четырьмя уравнениями. Если в качестве известной величины взять одну из этих переменных, то остальные можно выразить через неё. Предположим, что известной величиной является кинетический момент  $L$ , тогда

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{L^2}{Ze^2 m_e}; & v &= \frac{Ze^2}{L}; & \omega &= \frac{Ze^4 m_e}{L^3}; & W &= -\frac{Ze^4 m_e}{2L^2}. \end{aligned} \right\}$$

Далее Нильс Бор предположил, что **кинетический момент не может принимать произвольных значений, а подчиняется правилу квантования Макса Планка**, т.е.

$$L = n\hbar,$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ , поскольку с  $L$  связаны все остальные переменные, то они тоже становятся квантованными

$$\left. \begin{aligned} r_n &= \frac{n^2}{Z} \left( \frac{\hbar^2}{m_e e^2} \right); & v_n &= \frac{Z}{n} \left( \frac{e^2}{\hbar e} \right) c; \\ \omega_n &= \frac{Z^2}{n^3} \left( \frac{m_e e^4}{\hbar^3} \right); & W_n &= -\frac{Z^2}{n^2} \left( \frac{m_e e^4}{2\hbar^2} \right). \end{aligned} \right\}$$

Первое уравнение системы позволяет ближайшую к ядру атома орбиту охарактеризовать радиусом, который в системе СИ представится как

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2} \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м} \approx 0,53 \text{ \AA},$$

и называется **Боровским радиусом**. Энергетический масштаб оценивается **постоянной Ридберга**

$$Ry = \frac{m_e e^4}{4\pi c \hbar^3} = \frac{e^2}{2a_0} \cong 13,6 \text{ эВ}.$$

В качестве энергии в 1 эВ принимается энергия электрона, прошедшего разность потенциалов в 1 вольт,  $1 \text{ эВ} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Число  $n$  в квантовой механике называется **главным квантовым числом**.

Бор постулировал, что поглощение и излучение энергии электроном происходит скачкообразно, только при переходе из одной разрешённой орбиты на другую, причём **скачкообразное перемещение с высокой орбиты  $W_n$  на более энергетически низкую орбиту  $W_{n-1}$  сопровождается испусканием кванта энергии, т.е. фотона**.

Естественно предположить, что таким же образом электрон меняет орбиту при поглощении кванта энергии. Причём падающий фотон должен иметь такую же величину энергии, чтобы она компенсировала разность энергий между двумя разрешёнными уровнями. Состояние электрона с  $n = 1$  принято за основное, в котором не происходит излучения энергии.

Атомы веществ в естественном состоянии находятся в большинстве своём в стационарном состоянии. Чтобы подняться на более высокий энергетический уровень, электрон должен захватить подходящий фотон. Все состояния с  $n > 1$  являются нестабильными.

Введя таким образом в ядерную модель атома Резерфорда квантовые представления, Нильс Бор сформулировал два постулата (два основных положения).

- **Электроны могут находиться в атоме только на определённых орбитах, причём, несмотря на ускоренное движение, излучения электромагнитных волн не происходит.** Орбиты, соответствующие стационарным состояниям определяются условием

$$m_e v_n r_n = \frac{nh}{2\pi}.$$

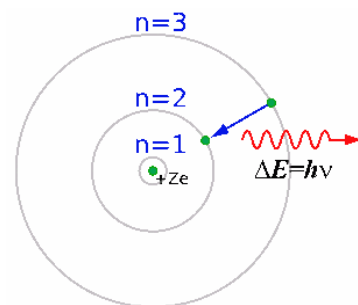
**Атом излучает или поглощает квант электромагнитной энергии при переходе электрона из одного стационарного состояния в другое (рис. 8.6)**

$$h\nu = W_n - W_{n-1}.$$

Применив свои постулаты к простейшему атому водорода, Нильс Бор получил следующее условие стационарности орбит

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ee}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}.$$

Выразим из первого постулата скорость электрона



Излучение фотона



$$v_n = \frac{nh}{2\pi m_e r_n},$$

возведём её в квадрат и подставим в уравнение радиуса орбиты

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots).$$

Как следует из уравнения радиусы разрешённых электронных орбит пропорциональны  $n^2$ . Если уравнение разрешить для главного квантового числа  $n = 1$ , то получится Боровский радиус  $r_1 \approx 5,28 \cdot 10^{-11}$  м. Если ядро атома считать неподвижным, то электрон на орбите можно описать следующими энергетическими соотношениями, выраженными в системе СИ

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{m_e v_n^2}{2} = \frac{e^2}{8\pi \epsilon_0 r_n}; \\ \Pi &= \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 r_n}; \\ W &= K + \Pi = -\frac{e^2}{8\pi \epsilon_0 r_n}. \end{aligned} \right\}$$

Минимальной энергией обладает электрон при  $n = 1$ . Энергия в произвольном разрешённом состоянии определится как

$$W_n = -\frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}.$$

В отличие от модели атома Резерфорда, постулаты Бора и записанные выше уравнения смогли объяснить линейчатые спектры атомов, в частности атома водорода. Согласно второму постулату Бора излучаемый или поглощаемый квант энергии определяется условием

$$h\nu = W_2 - W_1 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

Уравнение можно записать для частоты и длины волны

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{m_e e^4}{8h^3 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \\ \frac{1}{\lambda} &= \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 c} \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right). \end{aligned}$$

Сомножитель последнего уравнения оказался совпадающим в первом приближении со значением постоянной Ридберга, полученной первоначально экспериментальным путём

$$R = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2 c},$$

что рассматривается, как одно из подтверждений справедливости квантовой модели атома Бора. Бор показал, что для более точного вычисления постоянной Ридберга необходимо внести корректировки в уравнения, связанные с подвижностью ядра.

Теория водородоподобного атома Нильса Бора позволила объяснить его линейчатые спектры, обусловленные переходами электрона из одного стационарного состояния в другое, с меньшей энергией.

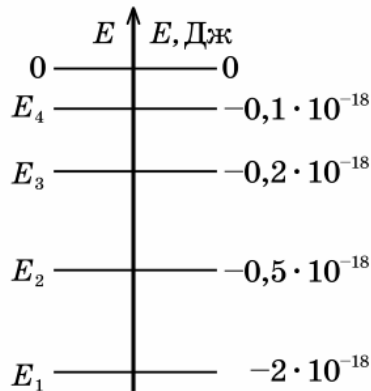
Каждая, регистрируемая экспериментально спектральная линия является свидетельством акта испускания фотона определённой длины волны, при переходе электрона на низший энергетический уровень

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.

Касаясь задачи. Возбуждённое состояние – это ещё не ионизация. Атом получил две порции энергии, а это больше чем одна, поэтому максимальное значение энергии будет в ионизированном состоянии.

**А6.** На рисунке изображена схема возможных значений энергии атомов газа. Какие фотоны могут поглощать те атомы, которые находятся в состоянии с энергией  $E_3$ ?



- 1) фотоны с любой энергией, большей  $0,2 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 2) фотоны с любой энергией в пределах от 0 до  $0,2 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 3) фотоны с энергией  $0,1 \cdot 10^{-18}$  Дж и  $0,2 \cdot 10^{-18}$  Дж
- 4) фотоны с энергией  $0,1 \cdot 10^{-18}$  Дж,  $0,2 \cdot 10^{-18}$  Дж и любой, большей  $0,2 \cdot 10^{-18}$  Дж

**Решение**

$$h\nu = W_4 - W_3 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_4^2} - \frac{1}{n_3^2} \right); \Rightarrow \epsilon_f = 0,1 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} - 0,2 \cdot 10^{-18} \text{ Дж};$$

**А7.** Атом находится в состоянии с энергией  $E_1 < 0$ . Минимальная энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, равна

- 1) 0
- 2)  $E_1$
- 3)  $-E_1$
- 4)  $-\frac{E_1}{2}$

**Решение**

1. Энергия отрыва электрона составит

$$W_{\text{От}} = -E_1;$$

- C1. Покоящийся атом водорода в основном состоянии ( $E_1 = -13,6$  эВ) поглощает в вакууме фотон излучения с длиной волны равной 80 нм и ионизуется. Какова скорость электрона вдали от образовавшегося иона, если кинетическая энергия иона пренебрежимо мала по сравнению с энергией электрона?

**Решение**

$$\varepsilon_f = \frac{hc}{\lambda}; \quad \varepsilon_f + E_1 = K;$$

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} + E_1; \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2\left(\frac{hc}{\lambda} + E_1\right)}{m}} \approx \sqrt{\frac{2\left(\frac{2 \cdot 10^{-25}}{8 \cdot 10^{-8}} + 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\right)}{9,11 \cdot 10^{-31}}} \approx 3,21 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

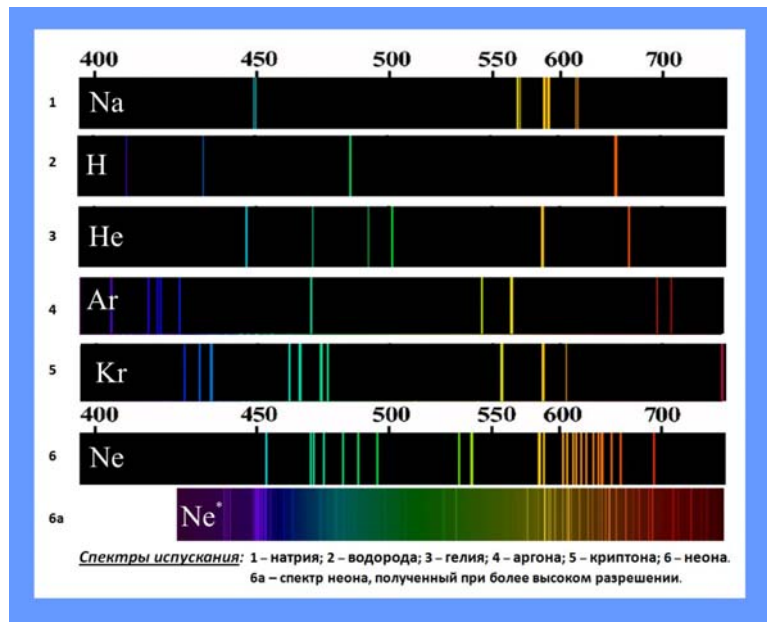
**Линейчатые спектры**

- A8. Химики обнаружили, если в пламя газовой горелки (цвет пламени синий) бросить щепотку поваренной соли (NaCl), то цвет пламени на время приобретет яркую желтую окраску. Это послужило основой разработки метода
- 1) измерения температуры пламени
  - 2) выделения натрия из поваренной соли
  - 3) спектрального анализа химического состава веществ
  - 4) нового горючего

**Решение**

1. При проникновении в глубины материи классическая физика, основанная на волновых представлениях, столкнулась с непреодолимыми трудностями при попытках объяснить происхождение сплошного спектра излучения нагретыми телами. Однако некоторые знания в виде закона Стефана – Больцмана и частного закона Рэля – Джинса позволяли сплошные спектры хоть как-то объяснять, предположив, допустим, сто они вызваны многомодальными колебаниями электронов вокруг своих положений равновесия. Поскольку колебательное движение – суть ускоренное, то электроны, в соответствие с электродинамикой Максвелла – Герца – Хевисайда, должны излучать электромагнитные волны в широком спектре длин.

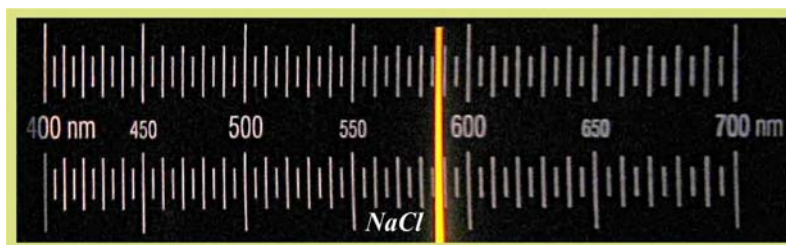
2. Сложнее дело обстояло с линейчатыми спектрами. Загадка линейчатых спектров была для классической физики совершенно неразрешимой. Кирхгоф и Бунзен



экспериментально установили, что линейчатые спектры, испускаемые атомами веществ, находящихся в газообразном состоянии, совпадают со спектрами поглощения тех же веществ, находящихся в таком же состоянии, и являются характерными для каждого газа.

3. Это обстоятельство привело к разработке, практически важных, методов и средств спектрального анализа. Однако закономерности распределения линий в спектре и причина их появления оставались невыясненными. Необходимо было создать модель атома, пригодную для объяснения спектров; одновременно эта модель должна была разъяснить закономерности химических связей и периодичность химических свойств, отраженную системой Менделеева.

4. Было установлено, что сплошные спектры характерны для веществ в твёрдом состоянии, а линейчатые – в газообразном. Самым простым способом получить ве-



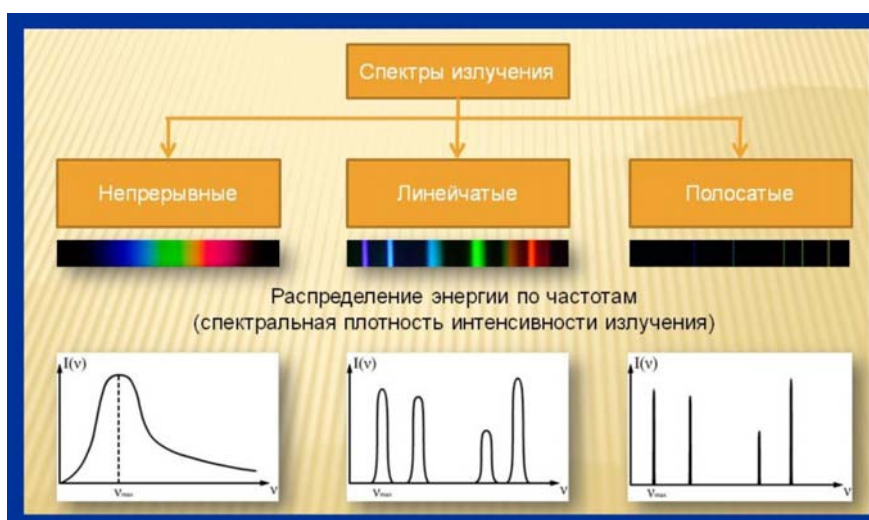
7.2. Сплошной и линейчатый спектры

щество из твёрдого состояния в газообразном (в виде атомов) состоянии – это его расплавить, а затем испарить, что и достигается внесением вещества в область высоких температур.

**A9.** Какого типа спектр получается от следующих источников: пламени костра; нити электрической лампы; спирали электроплитки; кратера электрической дуги; неоновой лампы; лампы дневного света?

### Решение

1. В спектроскопии принято различать непрерывные, линейчатые и полосатые типы спектров.

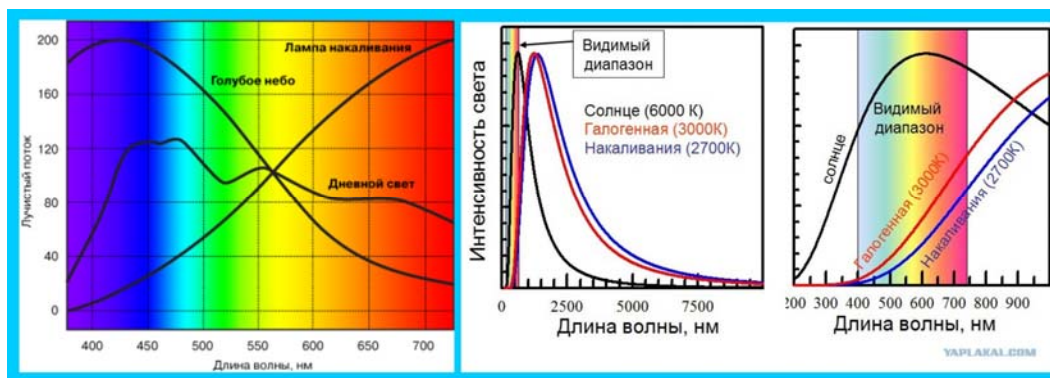


Типы спектров

2. Излучение оптических спектров показало, что сложные вещества (состоящие из разных атомов) при нагреве испускают электромагнитные волны всех длин в видимом диапазоне. К таким источникам относятся, например: солнце, лампы накаливания, нагретые до высоких температур металлы.

3. Чистые вещества, даже многоатомные, имеют спектры испускания, состоящие из отдельных длин волн.

4. Примерами непрерывных спектров может служить спектр электромагнитного излучения нагретого твердого тела, например нити электрической лампочки, спирали электроплитки (рис. 8.2.). К этому же типу спектра можно отнести свет пламени костра и свечи, свет излучается нагретыми твёрдыми частичками горючего вещества. Пламена, возникающие при горении газовых, жидких или твёрдых горючих веществ, имеют сплошной спектр излучения с  $T \approx 3000\text{ K}$ , образованный раскалёнными твёрдыми микрочастицами. В отсутствие таких частиц наблюдается полосатый и линейчатый спектр излучения, создаваемый газообразными продуктами горения или хим. элементами, специально вводимыми в пламя, например, для спектрального анализа методом пламенной фотометрии.



Спектр излучения нити накаливания

5. Газоразрядные источники излучения низкого давления в зависимости от плотности тока на катоде работают в режиме тлеющего или дугового разряда. В индикаторных лампах и панелях, обычно наполняемых смесью Ne с He и Ar, используется тлеющее свечение, локализованное вблизи катода. Ртутные люминесцентные лампы широко используются для внутреннего и декоративного освещения. На внутреннюю поверхность их стеклянной трубки наносится слой люминофора, преобразующий резонансное излучение Hg в видимую область со спектральным составом излучения, близким к дневному свету или определённой цветности.

6. Спектральные дуговые лампы с парами металлов (Hg, Cd, Zn, Tl, Na, K, Rb, Cs) излучают линейчатые спектры с яркими резонансными линиями металлов в видимой, ближних ультрафиолетовых и инфракрасных областях; лампы с инертными газами излучают линейчатые спектры с резонансными линиями инертных газов в вакуумной ультрафиолетовой области.

6. Водородные и дейтериевые лампы излучают рекомбинационный и молекулярный континуум в диапазоне  $\lambda \approx 500 - 165\text{ нм}$  и линейчатый спектр до  $\lambda \approx 90\text{ нм}$ .

7. Дуговые лаб. источники и серийные лампы высокого и сверхвысокого давления дают излучение высокой яркости с широко варьируемым спектром. Свободно горящая дуга, используемая в эмиссионном спектральном анализе, имеет неустойчивый канал, в который поступают испускающие линейчатый спектр пары материала электродов или спец. вставки в нём.



5. Примерами комбинированных спектров служат спектры излучения звёзд, где на сплошной спектр фотосферы накладываются хромосферные линии поглощения или большинство звуковых спектров.

6. В видимой области излучение нашей звезды – Солнца имеет непрерывный спектр. На фоне непрерывного спектра заметно несколько десятков тысяч темных линий поглощения, называемых фраунгоферовыми.

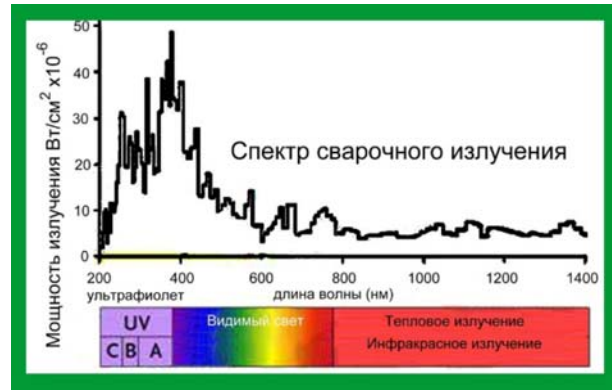
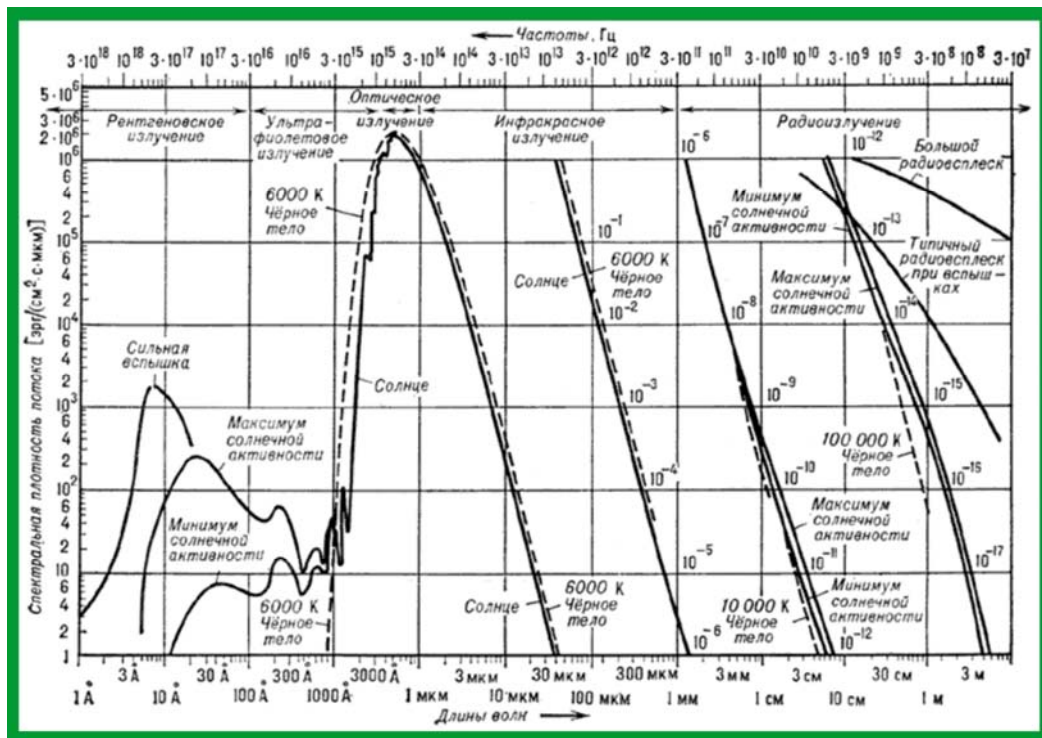


Рис. 8.3. Спектр сварочного излучения



Спектр излучения Солнца

7. Наибольшей интенсивности непрерывный спектр достигает в синезеленой части спектра, у длин волн  $\lambda \approx 4300 - 5000 \text{ \AA}$ . В обе стороны от максимума интенсивность солнечного излучения убывает.

8. Солнечный спектр далеко простирается в невидимые коротковолновую и длинноволновую области. Результаты внеатмосферных наблюдений спектра Солнца, полученные с ракет и искусственных спутников, показывают, что до длин волн около  $\lambda \approx 2000 \text{ \AA}$  характер солнечного спектра такой же, как и в видимой области. Однако в более коротковолновой области волн он резко меняется.

9. Инфракрасная область солнечного спектра до  $\lambda \approx 15 \text{ мкм}$  частично поглощается при прохождении сквозь земную атмосферу. Здесь расположены полосы молекулярного поглощения, принадлежащие в основном водяным парам, кислороду и углекислому газу. С Земли видны лишь некоторые участки солнечного спектра между этими полосами. Для длин волн,  $\lambda > 15 \text{ мкм}$ , поглощение становится полным, и спектр Солнца доступен наблюдениям только с больших высот или внеатмосферны-

ми методами. Поглощение спектра Солнца молекулами воздуха продолжает оставаться сильным вплоть до области радиоволн длиной около 1 см, для которых земная атмосфера снова становится прозрачной. При этом обнаруживается, что в радиодиапазоне интенсивность солнечного спектра значительно больше, чем должна быть у тела с температурой  $T \approx 6000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**A10.** В спектре излучения газообразного вещества имеются две линии, соответствующие длинам волн  $\lambda_1 < \lambda_2$ . Фотон с максимальным импульсом, покидающий светящийся газ, имеет импульс, равный

- 1)  $\frac{h\lambda_1}{c}$       2)  $\frac{h}{\lambda_1}$       3)  $\frac{h}{\lambda_2}$       4)  $\frac{h\lambda_2}{c}$

**Решение**

$$p_f = \frac{h}{\lambda_1};$$

**A11.** В таблице приведены значения энергии для первых четырех энергетических уровней атома водорода. Излучение с наибольшей длиной волны, наблюдаемое как отдельная линия в спектре испускания водорода, может быть получено при переходе между энергетическими уровнями

- 1) с  $n = 4$  на  $n = 1$   
 2) с  $n = 1$  на  $n = 4$   
 3) с  $n = 4$  на  $n = 3$   
 4) с  $n = 3$  на  $n = 4$

Ответ:

$n$	Энергия, $10^{-19}$ Дж
1	-21,8
2	-5,3
3	-2,4
4	-1,3

**Решение**

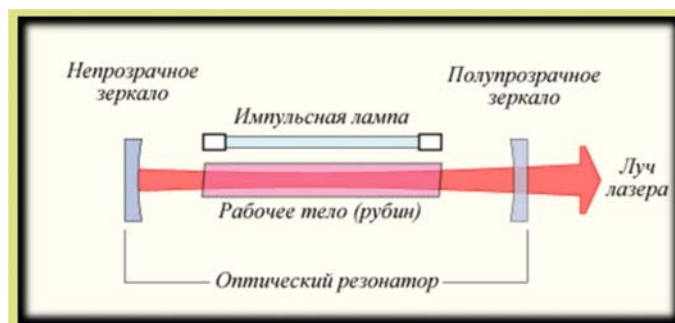
$$h\nu = W_4 - W_3 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left( \frac{1}{n_4^2} - \frac{1}{n_3^2} \right); \Rightarrow \epsilon_f = E_4 - E_3;$$

### Лазер

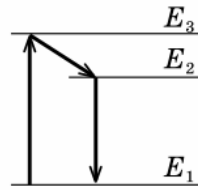
**A12.** Излучение лазера — это

- 1) тепловое излучение  
 2) вынужденное индуцированное излучение  
 3) спонтанное (самопроизвольное) излучение  
 4) люминесценция

**Решение**



- A13.** Для генерации лазерного света используется вещество, атомы которого могут находиться в основном состоянии с энергией  $E_1$ , метастабильном состоянии с энергией  $E_2$  и возбужденном состоянии  $E_3$ . При этом  $E_1 < E_2 < E_3$ . Излучение лазера имеет частоту, равную



- 1)  $\frac{(E_2 - E_3)}{h}$
- 2)  $\frac{(E_3 - E_1)}{h}$
- 3)  $\frac{(E_2 - E_1)}{h}$
- 4)  $\frac{(E_2 + E_3 - E_1)}{h}$

**Решение**

$$h\nu = E_2 - E_1; \quad \nu = \frac{E_2 - E_1}{h};$$

- A14.** Средняя мощность лазерного излучения равна  $W$ , длина волны  $\lambda$ . Число фотонов, ежесекундно излучаемых лазером, в среднем равно

- 1)  $\frac{W}{\lambda}$
- 2)  $\frac{W\lambda}{c}$
- 3)  $\frac{Wc}{h\lambda}$
- 4)  $\frac{W\lambda}{hc}$

**Решение**

$$\frac{W}{N} = \varepsilon_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}; \quad Nhc = W\lambda; \quad \Rightarrow \quad N = \frac{W\lambda}{hc};$$

- C2.** Длительность импульса лазера 1 нс, энергия в импульсе 0,3 Дж. Свет лазера падает на закопченное черное стекло перпендикулярно ему. Чему равно давление света на пластину при их взаимодействии, если диаметр лазерного пучка равен 1 мм?

**Решение**

$$P = \frac{W}{\pi r^2 \tau} \approx \frac{0,3}{3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-9}} \approx 1,26 \cdot 10^6 \text{ Па};$$



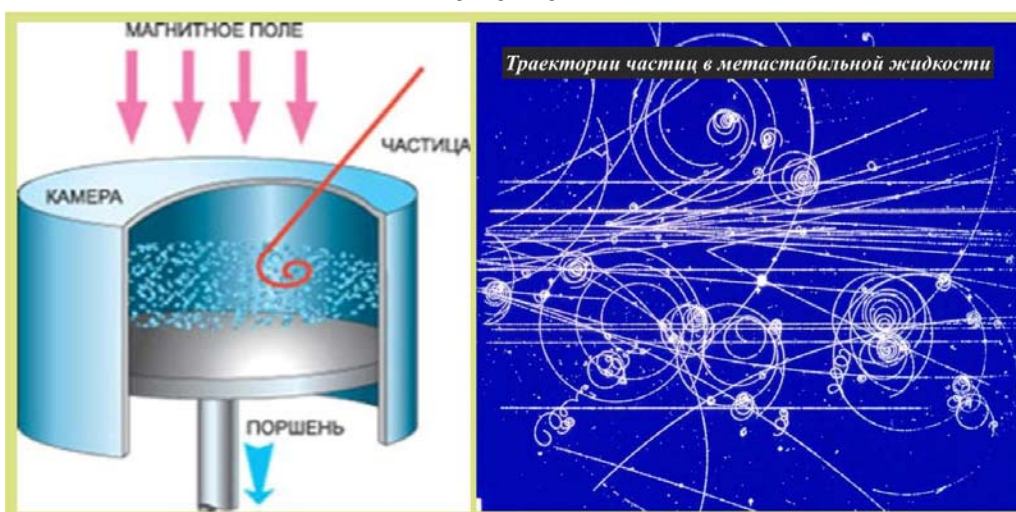
### 6.3. Физика атомного ядра

#### Методы наблюдения и регистрации частиц в ядерной физике

**A1.** Устройство, в котором регистрация траектории быстрых заряженных частиц осуществляется за счет конденсации пересыщенных паров воды при ионизации воздуха пролетающими частицами, называется

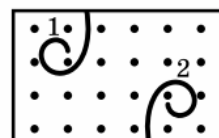
- 1) счетчик Гейгера
- 2) камера Вильсона
- 3) пузырьковая камера
- 4) толстослойная фотоэмульсия

**Решение**

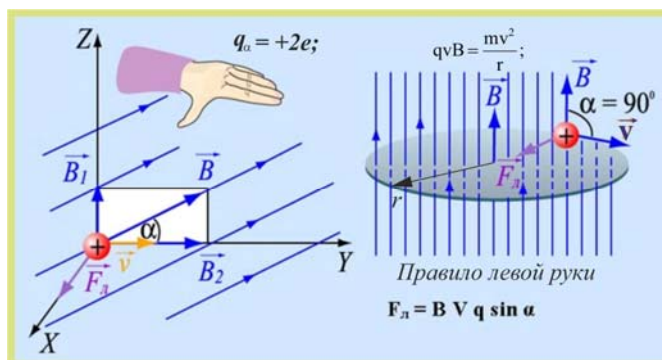


**A2.** В камере Вильсона, помещенной во внешнее магнитное поле таким образом, что вектор индукции магнитного поля направлен перпендикулярно плоскости рисунка на нас, были сфотографированы треки двух частиц. Какой из треков может принадлежать альфа-частице?

- 1) только первый
- 2) только второй
- 3) как первый, так и второй
- 4) ни один из приведенных



**Решение**



1.  $\alpha$ -частица имеет положительный заряд, поэтому по правилу левой руки сила Лоренца в первом случае будет вращать частицу по часовой стрелке, а во втором случае – против часовой стрелки.

**А3.** Источник радиоактивного излучения испускает  $\alpha$ -частицы, которые отклоняются в сторону отрицательно заряженной пластины конденсатора, а затем попадают в металлический приемник, который заземлен. Сила тока в заземляющем проводе достигает значения  $I$ . Сколько частиц зафиксирует за минуту на выходе этого источника счетчик Гейгера, если входное окошко счетчика ослабляет это излучение в  $n$  раз? Элементарный заряд равен  $e$ .

- 1)  $\frac{I}{en}$       2)  $\frac{30I}{en}$       3)  $\frac{60I}{en}$       4)  $n$

**Решение**

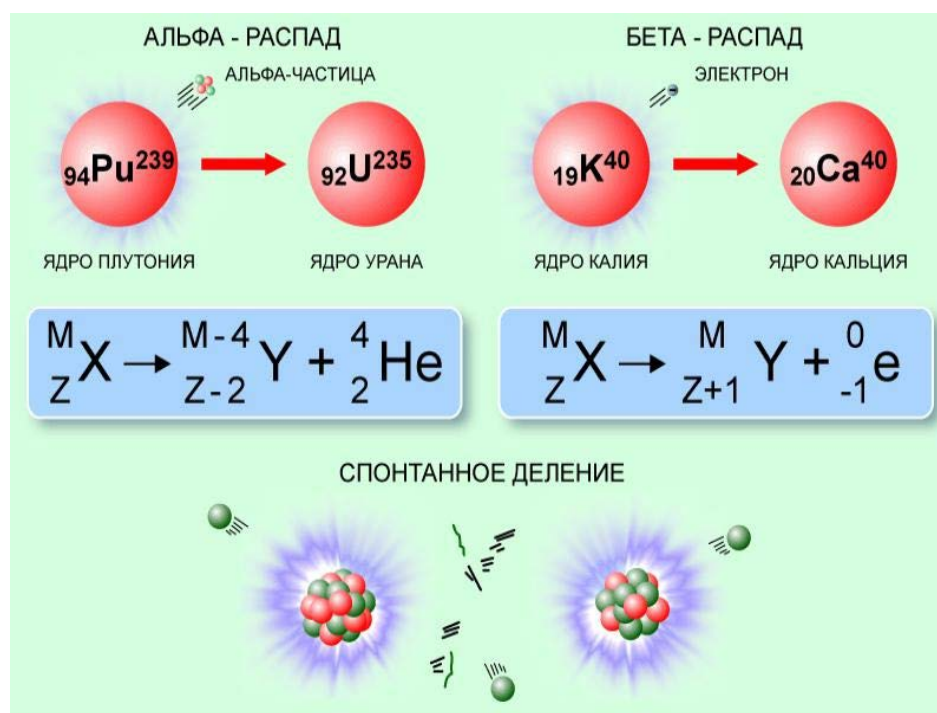
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{2eN}{n\Delta t}; \quad N = \frac{I\Delta t}{2en} = \frac{I \cdot 60}{2en} = \frac{30I}{en};$$

### Радиоактивность. Альфа-, бета-, гамма-излучения. Дозиметрия

**А4.**  $\alpha$ -излучение представляет собой поток

- 1) ядер гелия
- 2) электронов
- 3) протонов
- 4) нейтронов

**Решение**



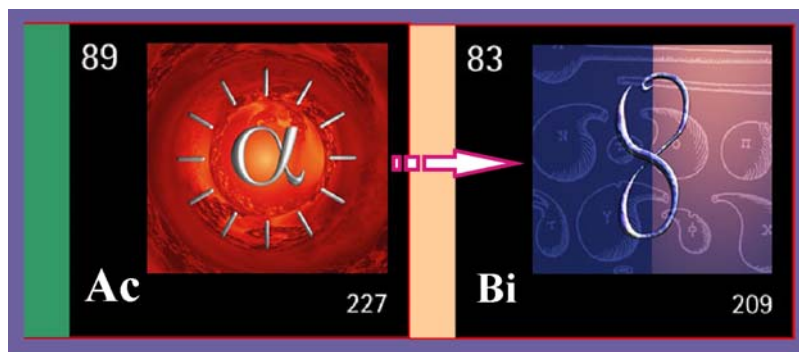
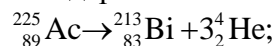
**A5.** Какой элемент образуется из изотопа актиния  ${}^{225}_{89}\text{Ac}$  в результате трёх  $\alpha$ -распадов?

**Решение**

1. Зарядовое и массовое число конечного элемента:

$$A_Y = A_X - 3 \cdot 4 = 83; \quad Z_Y = 89 - 3 \cdot 2 = 213; \quad \Rightarrow \quad {}^{213}_{83}\text{Y} \equiv \text{Bi};$$

2. Ядерная реакция образования ядер изотопа висмута из ядер актиния:

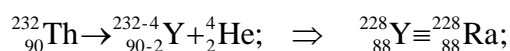


*Актиний и висмут*

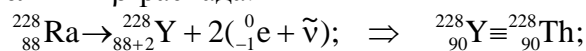
**A6.** Ядро изотопа тория  ${}^{232}_{90}\text{Th}$  претерпевает  $\alpha$ -распад, два электронных  $\beta$ -распада и ещё один  $\alpha$ -распад. Ядро какого изотопа получается в результате таких превращений? Записать ядерные реакции соответствующих превращений.

**Решение**

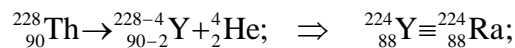
1. Первый  $\alpha$ -распад:



2. Два последовательных  $\beta$ -распада:

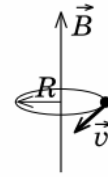


3. Второй  $\alpha$ -распад:



*Превращение ядра изотопа тория в ядро изотопа радия*

- C1. Радиоактивный элемент излучает  $\alpha$ -частицу, она попадает в магнитное поле и вращается в нем по окружности радиусом  $r = 10$  см со скоростью  $v = 10^5$  м/с (рис.). Чему равен модуль вектора магнитной индукции. Заряд электрона  $q = 1,6 \cdot 10^{-27}$  Кл, масса протона  $m = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.



### Решение

$$q_{\alpha} v B = \frac{m_{\alpha} v^2}{r}; \Rightarrow |\vec{B}| = \frac{m_{\alpha} v}{q_{\alpha} r}; \quad q_{\alpha} = +2e = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}; \quad m_{\alpha} = 4m_p = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$|\vec{B}| = \frac{6,7 \cdot 10^{-27} \cdot 10^5}{3,2 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1} \approx 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ Тл};$$

### Закон радиоактивного распада

- A7. Период полураспада ядер атомов некоторого вещества составляет 45 мин. Это означает, что
- 1) за 45 мин атомный номер каждого атома уменьшится вдвое
  - 2) каждые 45 мин распадается один атом
  - 3) половина изначально имевшихся атомов распадется за 45 мин
  - 4) все изначально имевшиеся атомы распадутся через 45 мин

### Решение

1. Существует несколько семейств радиоактивных элементов, общим для них является, то, что расположены они в самом конце таблицы Менделеева за свинцом  $\text{Pb}_{82}^{207}$ . Ядро свинца является самым тяжёлым из устойчивых ядер.

2. Процесс естественного распада ядер протекает самопроизвольно и не подвержен внешним влияниям. Поскольку в распаде одновременно участвуют множество ядер одновременно, то явление имеет статистический смысл. Скорость распада радиоактивных элементов принято характеризовать промежутком времени, за который распадается половина всех ядер, это время  $T$  называется периодом полураспада.

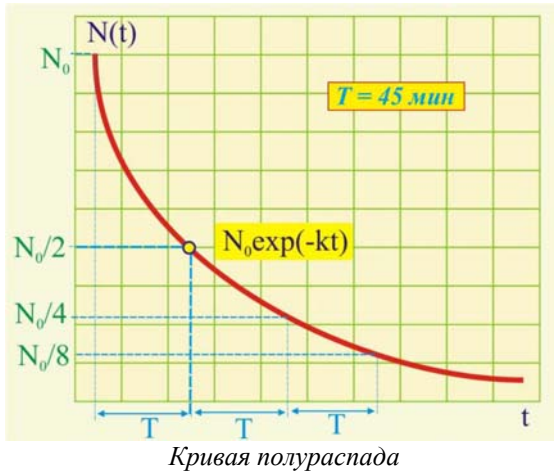
3. Так, например, период полураспада полония  $\text{Po}_{84}^{210}$  составляет  $T = 140$  суток, это значит, что от 1 кг полония в результате распада останется 500 г, а ещё через 140 дней – 250 г и так далее.

4. Таким образом, вероятность распада ядер полония, впрочем, как и всех других неустойчивых ядер, остаётся неизменной. Не распавшиеся за определённое время ядра имеют те же свойства, что и исходные ядра, т.е. процесс не является результатом эволюции ядер. **Ядра не подвержены «старению».**

5. Количественная оценка радиоактивного распада делается в предположении, что число распавшихся ядер за достаточно малый промежуток времени, всегда пропорционально исходному числу не распавшихся ядер.

6. 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:

$$-dN = \lambda N(t)dt,$$



где  $\lambda = -dN/N$  – постоянная распада при  $dt = 1$ . Другими словами, постоянная радиоактивного распада равна вероятности распада одного ядра за единицу времени. Разделим в дифференциальном уравнении переменные:

$$\frac{dN}{N(t)} = -\lambda dt, \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N(t)} = -\lambda \int_0^t dt,$$

откуда:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t},$$

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. Число распадов в единицу времени определится как:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N,$$

величина  $A$  называется активностью данного радиоактивного препарата. В качестве единицы активности используется кюри: 1 кюри =  $3,7 \cdot 10^7$  событий /с.

7. Эта величина соответствует примерно активности 1 г радия, активность которого соответствует 0,994 кюри. Уравнение  $N(t)$  позволяет установить взаимосвязь между постоянной распада и периодом полураспада:

$$N(T) = N_0 e^{-\lambda T} = \frac{1}{2} N_0,$$

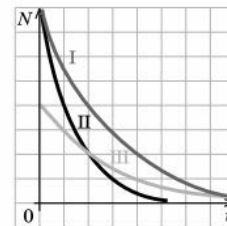
откуда следует, что

$$e^{-\lambda T} = \frac{1}{2}, \Rightarrow T = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \cong \frac{0,693}{\lambda}.$$

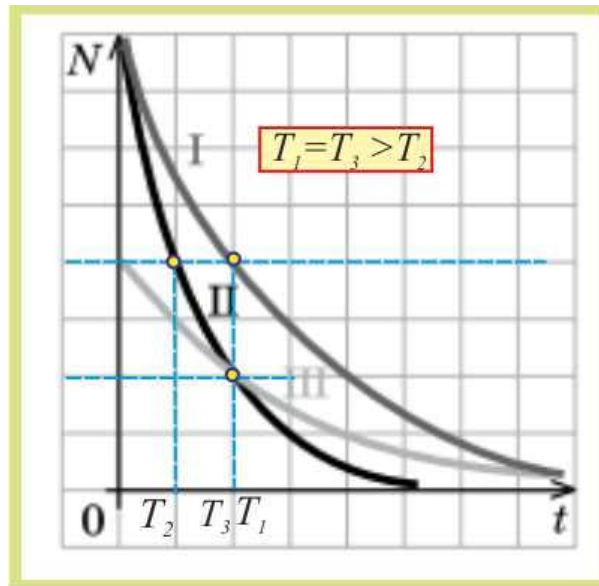
**A8.** На рисунке приведена зависимость числа нераспавшихся ядер  $N$  от времени в процессе радиоактивного распада для трех изотопов. Для какого из них период полураспада минимален?

- 1) I
- 2) II
- 3) III
- 4) у всех одинаков

Ответ:

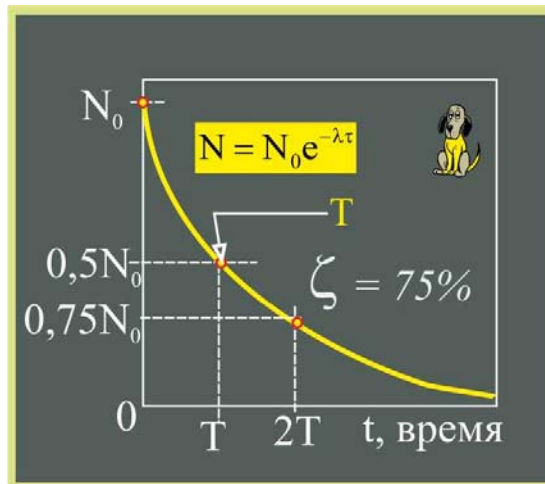


**Решение**



- В1.** Какая доля радиоактивных атомов распадется через интервал времени, равный двум периодам полураспада?

**Решение**



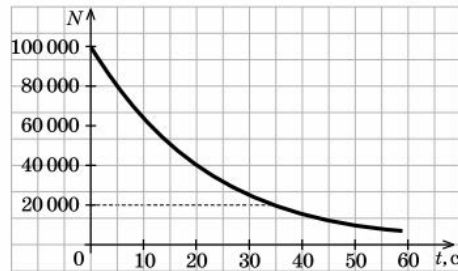
- А9.** Имеется  $10^8$  атомов радиоактивного изотопа йода  $^{128}_{53}\text{I}$ , период полураспада которого 25 мин. Какое количество ядер изотопа останется нераспавшимися через 50 мин?  
 1)  $\sim 2,5 \cdot 10^7$     2)  $\sim 5 \cdot 10^7$     3)  $\sim 7,5 \cdot 10^7$     4)  $\sim 10^8$

**Решение**

$\tau = 2T; \Rightarrow 0,75N_0$  распадётся,  $0,25N_0$  не распавшиеся ядра;  
 $N_x = 0,25N_0 \approx 2,5 \cdot 10^7;$

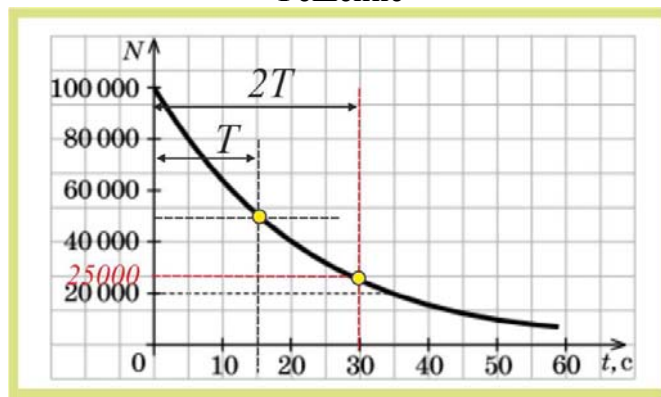


- A10.** На рисунке дан график зависимости числа нераспавшихся ядер изотопа франция  ${}^{207}_{87}\text{Fr}$  от времени. Через какой промежуток времени (в секундах) останется одна четвертая часть первоначального числа ядер?



- 1) 20 000 с      2) 35 с      3) 30 с      4) 15 с

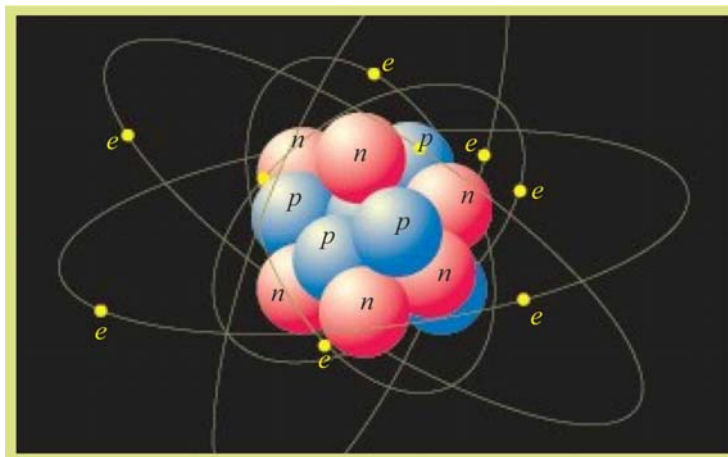
**Решение**



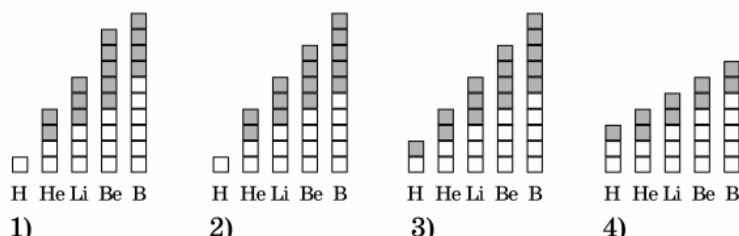
**Атомное ядро. Протонно-нейтронная модель ядра. Заряд ядра. Массовое число ядра. Ядерные силы**

- A11.** Ядро атома состоит из
- 1) нейтронов и электронов
  - 2) протонов и нейтронов
  - 3) протонов и электронов
  - 4) нейтронов

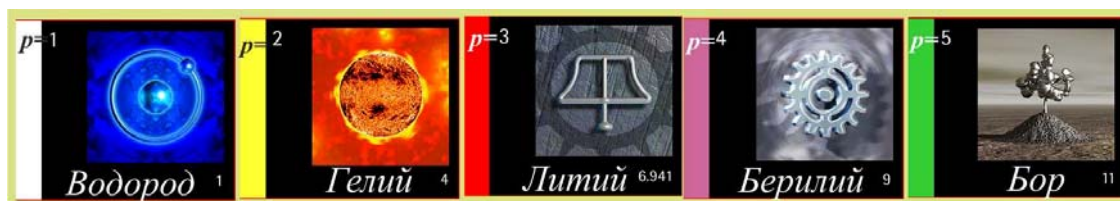
**Решение**



**A12.** В Периодической системе Менделеева указаны следующие номера и молярные массы элементов: H (№ 1; 1,00794), He (№ 2; 4,0026), Li (№ 3; 6,941), Be (№ 4; 9,01218), B (№ 5; 10,811). Выберите диаграмму, правильно отражающую соотношение числа протонов и нейтронов в ядрах наиболее распространенных изотопов различных элементов. Светлые квадратики на диаграмме — протоны, заштрихованные — нейтроны.



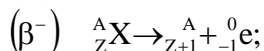
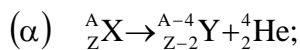
**Решение**



**A13.** Какой порядковый номер в таблице Менделеева имеет элемент, который образуется в результате  $\alpha$ -распада и последующего  $\beta$ -распада ядра элемента с порядковым номером  $Z$ ?

- 1)  $Z + 2$       2)  $Z + 1$       3)  $Z - 2$       4)  $Z - 1$

**Решение**



в результате  $\alpha$ -распада ядро теряет две единицы положительного заряда, а при  $\beta^-$ -распаде ядро увеличивает заряд на единицу

$$Z_{\alpha, \beta} = Z - 2 + 1 = Z - 1;$$

**B2.** Чему равно число нейтронов в ядре урана  ${}^{238}_{92} \text{U}$ ?

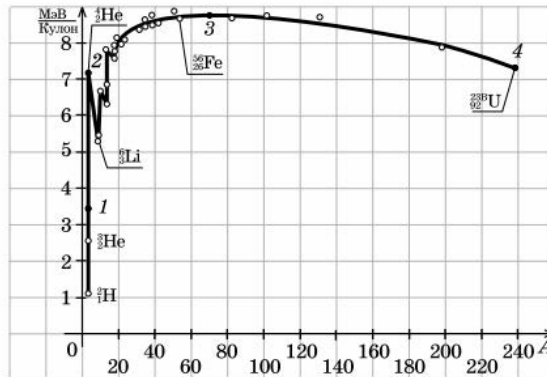
**Решение**

$$N_n = A - N_p = 238 - 92 = 146;$$



## Энергия связи частиц в ядре

- В3.** На графике представлена зависимость удельной энергии  $E_{уд}$  связи нуклонов в ядре атома от массового числа  $A$  атома. При распаде какого из ядер, отмеченных на кривой цифрами, может выделяться энергия?



### 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 гравитационное взаимодействие, убывает по мере возрастания расстояния, обратно пропорционально квадрату расстояния

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{1,2}^2}, \quad F_H = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r_{1,2}^2}.$$

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.

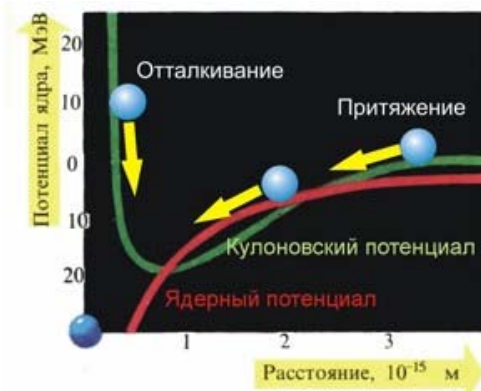
Ничего подобного не наблюдается у ядерных сил, радиус их действия не превышает радиуса ядра. В пределах этой области ядерное взаимодействие можно в грубом приближении сравнить с притяжением двух разноименных электрических зарядов величиной  $q = 3e$ . Для точечного источника сильного взаимодействия потенциал 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

$$U = -g^2 \frac{e^{-\mu r}}{r}.$$

Зависимость  $U = f(r)$  для двух нуклонов приведена на рис. Ядерные силы, в отличие



*Ядерные силы взаимодействия*

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.

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 кульке.

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.

Теория ядерных сил к настоящему времени далека от завершения, однако целый ряд их качественных и количественных характеристик определен вполне надёжно.

Все известные к настоящему времени поля материальны, поэтому можно считать, что и источником ядерного поля служат материальные объекты.

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.

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.

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.

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.

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.

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%.

**2. 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 – перенос-

чики, 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.

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.

Схема «работы» таких частиц выглядит следующим образом: протон генерирует такую положительно заряженную частицу, которая тут же поглощается соответствующим нейтроном, которому она «предназначена». Нейтрон превращается в протон, тогда как бывший протон теряет свой заряд и становится нейтроном.

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. В соответствии с принципом неопределённости для энергии можно записать следующее соотношение

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar .$$

Оценим приближённо величину этой энергии

$$\Delta E = \frac{\hbar}{\Delta t} \cong \frac{10^{-34}}{3,3 \cdot 10^{-24}} \cong 3 \cdot 10^{-11} \text{ Дж} \cong 190 \text{ МэВ} ,$$

Энергия, прямо скажем, впечатляющей величины, особенно с учётом её эквивалентности некой массе, в соответствии с теорией Оливера Хевисайда

$$E = mc^2 \Rightarrow m = \frac{E}{c^2} \cong 3,3 \cdot 10^{-28} \text{ кг} ,$$

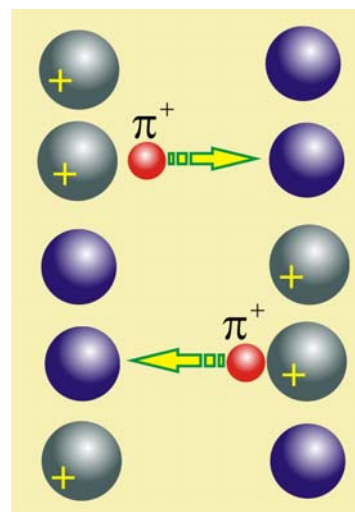
что составляет примерно 276 масс электрона. Обсуждаемая частица с фантастическими свойствами была предсказана Японским физиком Хидеки Юкавой в 1935 г.

Буквально годом позже частицы Юкавы были найдены в космическом излучении; их назвали  $\pi$  – мезонами. Масса этих частиц составляла 273,3 массы электрона.

Это удивительно близко к результатам оценки, но такое совпадение, в некоторой степени, случайно: величина  $r_i$  была выбрана более или менее произвольно. Конечно, и обмен мезонами не следует понимать чересчур буквально: это не более чем попытка описать на простом языке частиц явления, весьма далекие от наглядности.

**3. Дефект массы и энергия связи ядер.** Ядра всех элементов составлены из одинаковых протонов и нейтронов, это давало основание до поры считать, что для определения массы ядра достаточно сложить массы всех, входящих в ядро, частиц.

В классической физике аддитивность массы не вызывала сомнений в виду полнейшей очевидности. Применительно к ядру всё оказалось сложнее. **Было установлено, что масса ядра не равна в точности сумме масс нуклонов.**



Переносчики поля  
 $\pi$  – мезоны

Чтобы удалить протон или нейтрон из сложного устойчивого ядра, необходимо затратить некоторую энергию. Убыль энергии при объединении частиц в ядро эквивалентна, согласно соотношению Хевисайда  $E = mc^2$ , уменьшению массы.

Масса образующегося ядра меньше суммарной массы составляющих его частиц. Например, наибольшая потеря массы получается при образовании атома гелия. Сумма масс частиц  $He_2^4$  равна: 2 протона + 2 нейтрона + 2 электрона = 1 атом гелия =  $(2 \cdot 1,00727 + 2 \cdot 1,00865 + 2 \cdot 0,00055 = 4,03294$  а.е.м), а по табличным данным масса атома гелия равна 4,00261 а.е.м.

Атомная масса гелия оказывается на 0,3033 а.е.м. меньше. Такая характерная особенность наблюдается для любого нуклида. Масса целого атома всегда получается меньшей суммы масс составляющих его частей. Это явление называется **дефектом масс**.

Данный эффект имеет совершенно простое и очевидное объяснение. Ядра атомов представляют собой сложные образования, возникшие в процессе зарождения Солнечной системы. Ядра существующих в настоящее время элементов образовались путем слияния элементарных частиц. Как и в большинстве, самопроизвольно протекающих процессов, это объединение сопровождалось минимизацией энергии; часть энергии при этом высвобождалась.

Поскольку чудеса в Мире встречаются редко, то и в данном случае источником энергии могли быть только объединяющиеся частицы. Высвобождение энергии неизбежно должно было привести к уменьшению их массы.

Количественно точная величина этого «изъятия» в каждом отдельном случае вновь определяется из соотношения Хевисайда. Оценим энергетический эквивалент массы для ядра гелия, которое представляет собой, по сути,  $\alpha$  - частицу

$$E = \Delta mc^2 \cong 28,2 \text{ МэВ.}$$

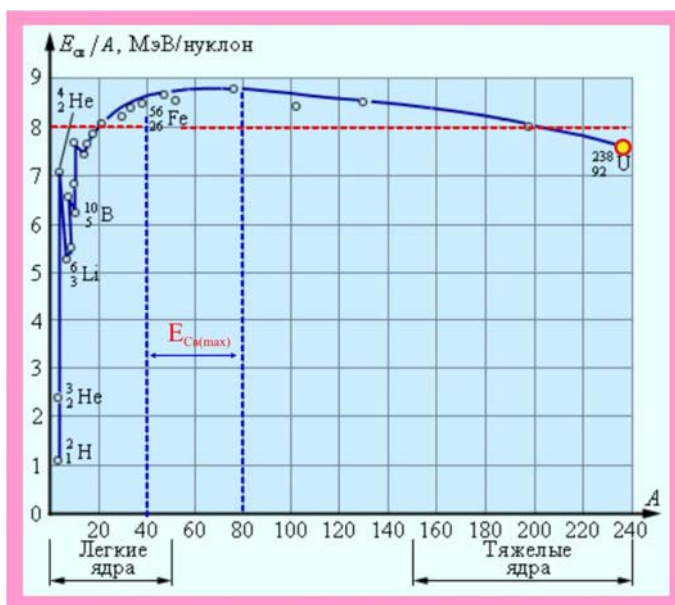
Для сравнения отметим, что количество тепла, выделяющегося при сгорании одного моля топлива, примерно в миллион раз меньше.

Чтобы  $\alpha$  - частица распалась, необходимо подвести к нему энергию не меньшую чем  $E$ .  $\alpha$  - частица образование чрезвычайно устойчивое, поэтому при спонтанном распаде ядра  $\alpha$  - частица генерируется как целый объект.

Энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре, называется удельной энергией связи. На рис. представлена зависимость энергии связи в зависимости от массового числа  $A$  ядра.

Сильнее всего нуклоны связаны в ядрах элементов с массовыми числами  $A = 50 - 60$ . Максимальная энергия связи для этой группы достигает 8,7 МэВ/нуклон и при дальнейшем росте  $A$  энергия постепенно убывает. Для урана  $U_{92}^{238}$  удельная энергия связи составляет примерно 7,5 МэВ/нуклон.

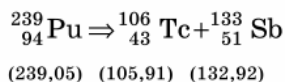
Не безынтересно, с позиций энергии связи, окинуть взором всю таблицу элементов. Если сравнить энергии связи с теми,



Удельная энергия связи

что высвобождаются при объединении атомов в молекулы или в других процессах, происходящих в атомных оболочках, то очевидно, что ядерные энергии в миллионы раз превышают энергии последних. Именно поэтому дефекты масс в химических или других подобных процессах столь малы, что практически их невозможно измерить. Для этих процессов справедлив классический закон сохранения массы в своей обычной форме.

**A15.** Ниже записана ядерная реакция, а в скобках указаны массы (в атомных единицах массы) участвующих в ней частиц. Поглощается или выделяется энергия при этой реакции?



- 1) выделяется
- 2) поглощается
- 3) не поглощается и не выделяется
- 4) недостаточно данных для ответа

### Решение

1. Дефект массы при протекании ядерной реакции превращения материнского ядра плутония в дочерние ядра технеция и сурьмы:

$$m_{\Sigma} = 105,91 + 132,92 \approx 238,83 \text{ а.е.м.} \quad \Delta m = 239 - 238,83 \approx 0,17 \text{ а.е.м.}$$

2. Энергия, высвобождающаяся при делении одного ядра плутония:

$$\Delta E = \Delta m c^2;$$

что и использовалось с успехом при производстве плутониевых атомных бомб.



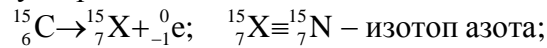
### Ядерные реакции. Сохранение заряда и массового числа в ядерных реакциях

**A16.** Нагретый газ, содержащий изотоп углерода  ${}_{6}^{15}\text{C}$ , излучает свет. Этот изотоп испытывает  $\beta$ -распад с периодом полураспада 2,5 с. Как изменится спектр излучения всего газа за 5 с?

- 1) Спектр углерода исчезнет и заменится спектром азота  ${}_{7}^{15}\text{N}$ .
- 2) Спектр станет ярче из-за выделяющейся энергии.
- 3) Спектр сдвинется из-за уменьшения числа атомов углерода.
- 4) Спектр углерода станет менее ярким, и добавятся линии азота  ${}_{7}^{15}\text{N}$ .

### Решение

1.  $\beta$ -распад изотопа углерода:



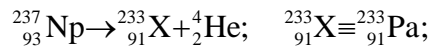
2. После двух периодов полураспада  $2T = 5$  с, изотопа углерода останется 25% от изначального количества ядер, но зато появятся ядра изотопа азота. Интенсивность линий углерода уменьшится и появятся линии азота.

---

**A17.** Радиоактивный изотоп нептуния  ${}^{237}_{93}\text{Np}$  после одного  $\alpha$ -распада превращается в изотоп

- 1)  ${}^{233}_{91}\text{Pa}$       2)  ${}^{238}_{92}\text{U}$       3)  ${}^{230}_{90}\text{Th}$       4)  ${}^{241}_{94}\text{Pu}$

### Решение



**A18.** Радиоактивный изотоп полония  ${}^{213}_{84}\text{Po}$  превращается в стабильное ядро полония  ${}^{209}_{84}\text{Po}$  в результате радиоактивных распадов:

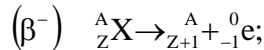
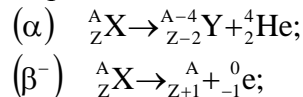
- 1) одного  $\alpha$  и одного  $\beta$
- 2) одного  $\alpha$  и двух  $\beta$
- 3) двух  $\alpha$  и одного  $\beta$
- 4) двух  $\alpha$  и двух  $\beta$

### Решение

1. Изменение массового и зарядового чисел:

$$\Delta A_x = 213 - 209 = 4; \quad \Delta Z_x = 0;$$

2. Уравнения  $\alpha$ -распада и  $\beta^-$ -распадов;



3. Массовое число уменьшается на 4 единицы при одно акте  $\alpha$ -распада, зарядовое число при этом изменяется на две единицы с плюсом, чтобы заряд вернуть к прежнему значению надо обеспечить подряд два  $\beta$ -распада.

---

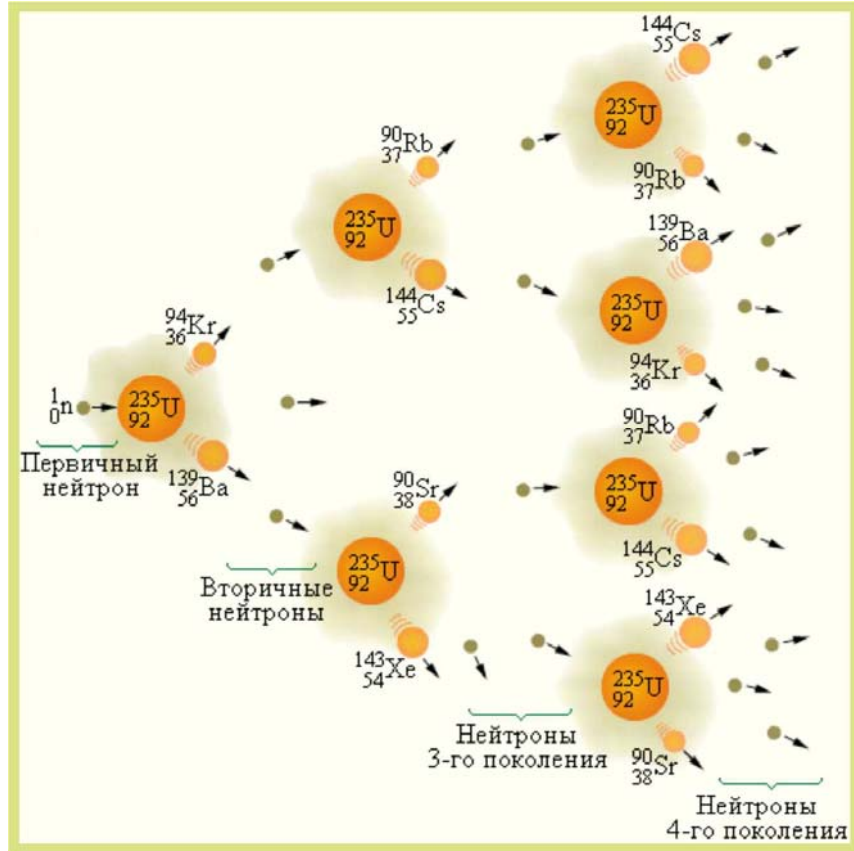
### Деление ядер. Цепная реакция деления ядер. Ядерная энергетика

**A19.** Для возникновения цепной реакции при делении тяжелых ядер наиболее существенно соотношение числа образующихся в ядерной реакции и поглощаемых в системе

- 1)  $\gamma$ -квантов
- 2) нейтронов
- 3)  $\alpha$ -частиц
- 4) электронов



### Решение



**A20.** При облучении нейтронами ядра урана  $^{235}_{92}\text{U}$  образуются

- 1) 2 сравнимых по массе осколка деления и несколько нейтронов
- 2)  $\alpha$ -,  $\beta$ -частицы и  $\gamma$ -излучение
- 3) новое ядро, сопровождаемое  $\gamma$ -излучением
- 4) новое ядро, сопровождаемое  $\alpha$ -распадом

### Решение

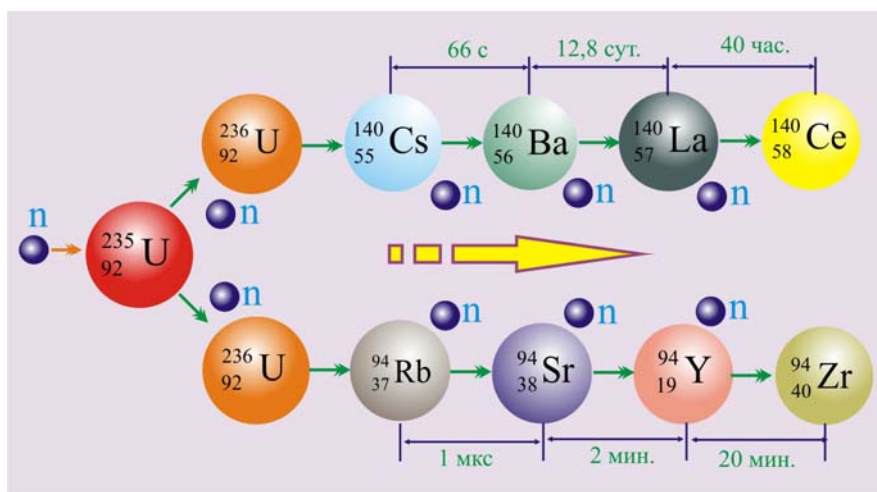
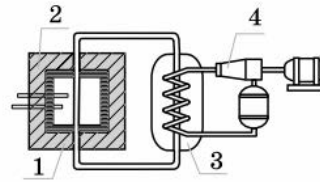


Схема распада ядер урана

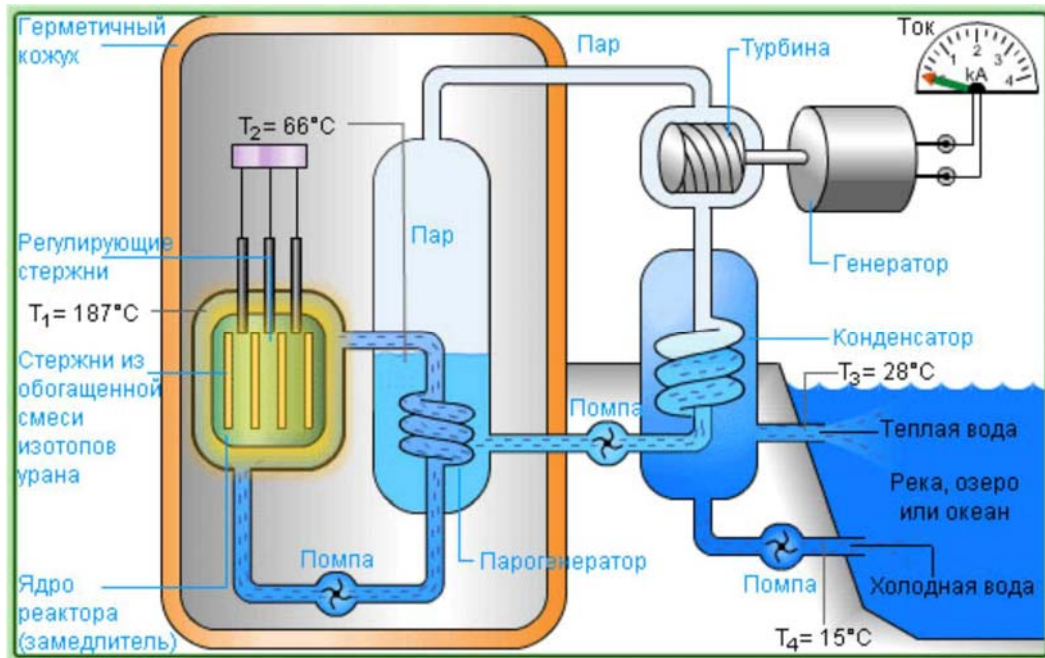
A21. На рисунке изображена блок-схема атомной электростанции. Какой цифрой обозначена зона, в которой тяжелые ядра радиоактивного топлива делятся с выделением энергии?

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 4

Ответ:



Решение



A22. Ядерной реакцией деления является

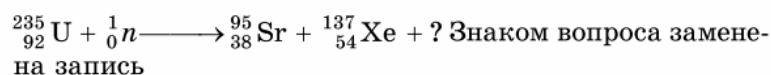
- 1)  ${}_{77}^{174}\text{Ir} \longrightarrow {}_{73}^{170}\text{Ta} + {}_2^4\text{He}$
- 2)  ${}_4^9\text{Be} + {}_2^4\text{He} \longrightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_0^1n$
- 3)  ${}_{100}^{246}\text{Fm} \longrightarrow {}_{51}^{123}\text{Sb} + {}_{49}^{120}\text{In} + {}_0^1n$
- 4)  ${}_0^1n \longrightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e$

Решение





**A23.** Один из возможных вариантов деления ядра урана  ${}_{92}^{235}\text{U}$  выглядит следующим образом:



- 1)  ${}_0^1n$       2)  ${}_{20}^1n$       3)  ${}_{40}^1n$       4)  ${}_{11}^1p + {}_0^1n$

### Решение

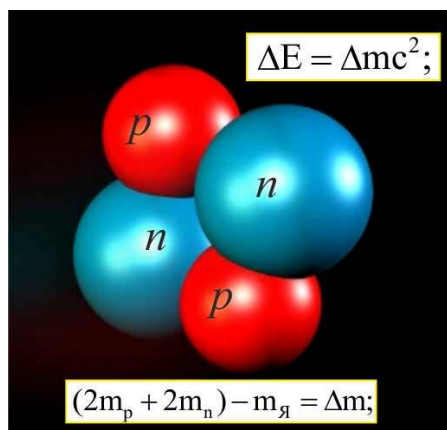
$$A_x = (235 + 1) - (95 + 137) = 4; \quad Z_x = 92 - (38 + 54) = 0; \quad \Rightarrow \quad X \equiv 4n;$$

### Термоядерный синтез

**A24.** Как изменяется полная энергия системы при распаде ядра гелия на составляющие его частицы?

- 1) увеличивается
- 2) уменьшается
- 3) не изменяется
- 4) увеличивается или уменьшается в зависимости от начального расстояния между ядрами дейтерия

### Решение



**A25.** Почему массы всех ядер меньше массы образующих их протонов и нейтронов в свободном состоянии?

### Решение

1. Внутри ядер, отличающихся весьма малыми размерами  $\approx 10^{-15}$  м, между парами нуклонов действуют ядерные силы, которые не подчиняются классическим законам взаимодействия и локализуют нуклоны в пределах объёма, занимаемого ядрами.

2. Провести анализ внутриядерного взаимодействия на примере самого простого ядерного образования – на примере дейтронов, состоящих из одного протона и одного нейтрона. Как показали исследования, масса одного дейтрона  $m_D$  несколько меньше суммы масс свободного протона  $m_p$  и свободного нейтрона  $m_n$ :

$$m_p + m_n > m_D;$$

3. В ядерной физике принято употреблять не ядерные веса, а атомные, это обусловлено тем, что электронные оболочки имеют суммарную массу много меньшую,

чем масса ядра, которому электроны принадлежат. Таким образом, указанная замена при вычислениях приводит к незначительным погрешностям.

4. Воспользовавшись табличными данными, определим величину несовпадения масс ядра дейтрона и свободных протона и нейтрона:

$$m_p + m_n \approx 1,6726 \cdot 10^{-27} + 1,6749 \cdot 10^{-27} = 3,3475 \cdot 10^{-27} \text{ кг};$$

$$m_p + m_n \approx 1,007825 + 1,008665 \approx 2,016490 \text{ а.е.м.}$$

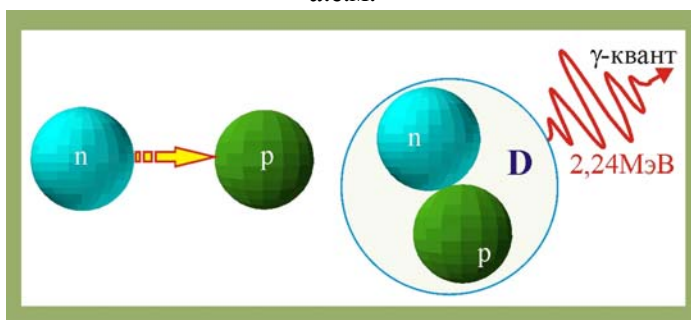
$$m_D \approx 2,014102 \text{ а.е.м.}$$

$$\Delta m \approx (m_p + m_n) - m_D \approx 0,002388 \text{ а.е.м.}$$

5. Между массой и энергией, как известно, существует взаимосвязь, поэтому:

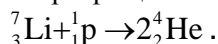
$$\varepsilon_{\text{св}} = [(m_p + m_n) - m_D] c^2 \approx 0,002388 \cdot 931,481 \frac{\text{МэВ}}{\text{а.е.м.}} \approx 2,224 \text{ МэВ};$$

6. Энергию связи можно условно на качественном уровне интерпретировать следующим образом. Если свободный протон захватывает свободный нейтрон, то образуется ядро дейтрона, при разность энергии  $\varepsilon_{\text{св}}$  будет испущена в виде  $\gamma$ -кванта.



Энергия связи

**A26.** Какую массу воды  $M$  можно нагреть от  $0^\circ\text{C}$  до кипения, если использовать все тепло, выделяющееся при ядерной реакции превращения лития в две  $\alpha$ -частицы:



За время реакции было расщеплено  $m = 10^{-3}$  кг лития?

### Решение

1. Определим количество ядер, содержащихся в заданной массе лития:

$$\frac{m}{\mu} = \frac{N_x}{N_A}; \Rightarrow N_x = \frac{m N_A}{\mu};$$

2. Количество тепла, необходимого для нагревания воды:

$$Q_T = c_B M \Delta T = c_B M \cdot 100; \Rightarrow M = \frac{Q_T}{10^2 c_B};$$

3. Энергия, высвобождающаяся при расщеплении одного ядра лития:

$$Q_1 = c^2 (\sum m_1 - \sum m_2);$$

4. Энергия, высвобождающаяся при расщеплении всей массы лития:

$$Q_\Sigma = \frac{m N_A c^2}{\mu} (\sum m_1 - \sum m_2);$$

5. Масса нагретой до кипения воды:

$$M = \frac{m N_A c^2}{10^2 c_B \mu} (\sum m_1 - \sum m_2) \approx 0,563 \text{ кг};$$

## 7. Методы научного познания. Физическая картина мира

### 7.1. Методы познания в физике

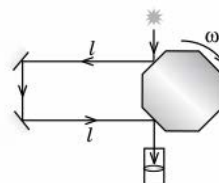
A1. В физике утверждение считается истинным, если оно

- 1) широко известно
- 2) опубликовано в газетах
- 3) высказано авторитетными учеными
- 4) многократно экспериментально проверено разными учеными

#### Решение

1. Теории, подтверждённые экспериментально принять считать истинными, хотя в современных представлениях, особенно на уровне микромира проведение прямых непосредственных экспериментов часто не представляется возможным. Вот теория относительности Эйнштейна, например, несмотря на всеобщий ажиотаж, похвастаться многочисленными экспериментальными подтверждениями похвастаться не может, хотя.

C1. На основании астрономических исследований была определена скорость света, которая оказалась примерно равна  $3 \cdot 10^8$  м/с. На рисунке показана установка Майкельсона для одного из первых измерений скорости света в земных условиях. С какой частотой нужно было вращать восьмигранную призму в опыте Майкельсона, чтобы за время прохождения луча света от призмы до зеркала и обратно призма повернулась на  $\frac{3}{8}$  оборота? Расстояние от призмы до зеркала  $l = 35$  км. Ответ округлить до двух значащих цифр.



Дано:  
 $c = 3 \cdot 10^8$  м/с  
 $l \approx 3,5 \cdot 10^4$  м/с;  
 $\zeta = 8$

$V = ?$

$$\frac{2l}{c} = \frac{\Delta\varphi}{2\pi\nu};$$
$$\Delta\varphi = \frac{3 \cdot 2\pi}{8} = 2,36 \text{ рад};$$
$$\nu = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi l};$$
$$\nu \approx \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 2,36}{12,6 \cdot 3,5 \cdot 10^4} \approx 1610 \text{ об/с};$$

**A2.** Какое из уравнений отражает закон физики, справедливость которого подтверждается не в непосредственной экспериментальной проверке соотношений между величинами, входящими в него, а совокупностью экспериментов, проверяющих теоретические выводы, сделанные на его основе?

$$1) I = \frac{\dot{A}}{R+r} \quad 2) u = \frac{3}{2} NkT \quad 3) pV = \frac{m}{M} RT \quad 4) F = -kx$$

**Решение**

1. Уравнение изменения внутренней энергии идеального газа

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

является суммой энергий всех структурных элементов, измерение которых не представляется возможным, однако:

$$p \Delta V = \nu R \Delta T; \Rightarrow R \Delta T = \frac{p \Delta V}{\nu}; \Rightarrow \Delta U = \frac{i p \Delta V \nu}{m}$$

**A3.** Период обращения и радиус орбиты Фобоса, одного из спутников Марса, были измерены астрономами и оказались примерно равными соответственно 7,6 ч и 9400 км. Гравитационная постоянная, измеренная Г. Кавендишем на Земле, равна примерно  $6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$ . Можно ли вычислить на основании этих данных массу Марса?

- 1) нет, так как константы, измеренные на Земле, нельзя использовать для расчетов параметров других планет
- 2) нет, так как масса — экспериментально измеряемая, а не вычисляемая теоретически величина
- 3) да, на основании 2-го закона Ньютона и закона всемирного тяготения она может быть оценена в  $6 \cdot 10^{23} \text{ кг}$
- 4) да, на основании законов Ньютона ее масса примерно равна массе Земли  $6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$

**Решение**

$$\omega = \frac{1}{2\pi T}; \quad G \frac{mM}{R^2} = \frac{mv^2}{R}; \quad G \frac{M}{R} = \omega^2 R^2; \quad G \frac{M}{R} = \frac{R^2}{4\pi^2 T^2}; \quad M = \frac{R^3}{4\pi^2 T^2 G};$$

**C2.** Опишите на примере из атомной физики, как взаимосвязаны теория и эксперимент в процессе познания природы.

**Решение**

1. Дж. Дж. Томсон открыл электрон, измерил его удельный заряд и предложил первую в мире модель атома — "пудинг с изюмом";
2. Исследуя эту модель атома экспериментально Резерфорд пришел к идее планетарной модели атома.
3. 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.

4. Процессы перехода электрона из одного состояния в другое при излучении и поглощении энергии теоретически проанализировал Нильс Бор. Бор ввёл в рассмотрение, так называемое, условие частот, которое разрешало атому излучать или поглощать энергию только в определённом квантовом состоянии. Применяя условие частот к гармоническому осциллятору можно видеть, что при их переходе из одного энергетического состояния  $W_1 = n_1 h\nu$  в состояние, в другое с энергией  $W_2 = n_2 h\nu$ , можно записать

$$\Delta W = (n_1 - n_2) h\nu.$$

Изменение энергии с частотой в этом случае по Бору записывается следующим уравнением

$$h\tilde{\nu} = (n_1 - n_2) h\nu.$$

Трактовка последней формулы с позиций классической волновой теории, когда излучаемая частота совпадает с частотой собственных колебаний осциллятора, приводит к результату

$$n_1 - n_2 = 1,$$

или в противном случае необходимо предположить, что излучаемая частота отличается от собственной частоты рассматриваемой колебательной системы, в этом случае излучение не монохроматично. Для устранения этого противоречия теоретикам квантовых представлений пришлось ввести принцип соответствия, регулирующий частоту переходов между состояниями.

### Моделирование явлений и объектов природы

**A4.** Какой из приведенных ответов является верным ответом на вопрос: в каких случаях нельзя использовать модель идеального газа?

- A. при температурах, близких к абсолютному нулю
- B. при высоких концентрациях частиц

- 1) только в случае A
- 2) только в случае B
- 3) в обоих случаях
- 4) ни в одном случае

#### Решение

A. При температурах близких к абсолютному нулю, в представлениях классической термодинамики, движение структурных элементов вещества останавливается

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

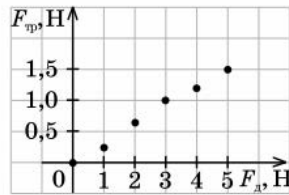
всякие модели, включая модель идеального газа, теряют смысл, т.к. МКТ предполагает непрерывное хаотическое тепловое движение.

B. При высоких концентрациях частиц (модель реального газа):

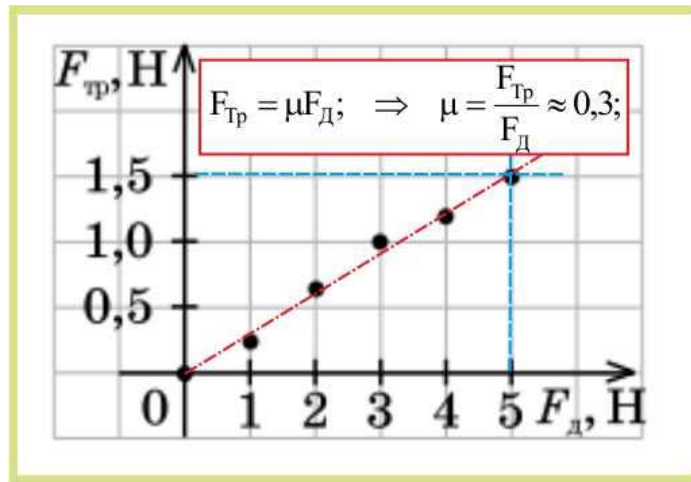
$$\left(p + \frac{a}{V_\mu^2}\right)(V_\mu - b) = RT;$$

**A5.** При исследовании зависимости силы трения от силы нормального давления были получены результаты, представленные на графике. Наиболее точно отражает результаты эксперимента зависимость

- 1)  $F_{\text{тр}} = 0,3F_{\text{д}}$
- 2)  $F_{\text{тр}} = 0,2F_{\text{д}}$
- 3)  $F_{\text{тр}} = 0,1F_{\text{д}}$
- 4)  $F_{\text{тр}} = 0,4F_{\text{д}}$



**Решение**



**A6.** Зависимость координаты материальной точки от времени задается уравнением  $x(t) = At^2 + Bt + C$ , где  $A$ ,  $B$  и  $C$  числовые коэффициенты. Скорость и ускорение тела в момент времени  $t = 0$  равны соответственно

- 1)  $A$  и  $C$
- 2)  $B$  и  $A$
- 3)  $B$  и  $C$
- 4)  $B$  и  $2A$

**Решение**

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}; \Rightarrow \text{при } t = 0, \quad v_x = B; \quad a = 2A;$$

**A7.** В таблице зафиксированы значения силы притяжения заряженных тел при разных расстояниях между ними. Какой вывод о связи силы притяжения и расстояния между телами можно сделать по этой таблице?

$r$ , см	1	2	4	8
$F$ , Н	$10^{-8}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$0,6 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-10}$

- 1) Сила очень мала, и можно считать, что сила не зависит от расстояния.
- 2) Сила уменьшается обратно пропорционально расстоянию.
- 3) Зависимость не прослеживается.
- 4) Сила уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния.

**Решение**

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}; \Rightarrow F_k \sim \frac{1}{r^2};$$


---

**Научные гипотезы**

**A8.** Какой из двух экспериментов доказывает гипотезу, что звук распространяется только в материальной среде?

I. Через получасовые интервалы стреляли из пушки, расположенной на расстоянии 30 км, и наблюдатели отмечали промежуток времени между появлением вспышки и моментом, когда был услышан звук.

II. Колокол помещали в сосуд, из которого можно было откачивать воздух. Туда же помещали механизм, который позволяет колоколу звонить автоматически. Слух отчетливо улавливал ослабление звука по мере уменьшения давления воздуха в сосуде

- 1) только I    2) только II    3) и I, и II    4) ни I, ни II

**Решение**

1. Одномерное волновое уравнение для звуковых волн:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2},$$

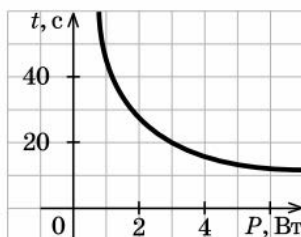
где  $\xi$  – смещение частиц среды,  $x$  – координата,  $\rho$  – плотность среды,  $E$  – модуль упругости среды,  $t$  – время.

2. В эксперименте II подтверждается справедливость волнового уравнения, а лучше попробовать стрелять из пушки, например на Луне, тоже эффективно.

---

**A9.** Экспериментально исследовалась зависимость времени закипания воды от мощности кипятильника. По результатам измерений построен график, приведенный на рисунке. Какой вывод можно сделать по результатам эксперимента?

- 1) Время нагревания прямо пропорционально мощности нагревателя.
- 2) С ростом мощности нагревателя вода нагревается быстрее.



- 3) Мощность нагревателя с течением времени уменьшается.  
 4) С ростом мощности нагревателя вода нагревается медленнее.

**Решение**

$$Pt = cm\Delta T = cm(373,15 - T_0); \Rightarrow t \approx \frac{cm(373,15 - T_0)}{P}; \Rightarrow t \sim \frac{1}{P};$$

**A10.** Резиновый шарик, надутый воздухом, летом опускают в озеро на глубину 1 м. Наблюдая за шариком под водой, обнаруживают, что диаметр шара уменьшился на 30%, хотя выделения пузырьков воздуха не обнаруживается. Какие из гипотез для объяснения этого явления требуется проверять экспериментально.

- А. Температура воды ниже температуры воздуха.  
 Б. Давление на стенки шара возросло.  
 В. Оболочка шара стала менее растяжимой.

- 1) только А  
 2) только Б  
 3) только В  
 4) только А и Б

**Решение**

$$pV = \frac{m}{\mu}RT; \quad V = 6\pi D^3 = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{p} = v \frac{RT}{p_0 + \rho gh}; \Rightarrow D = \sqrt[3]{\frac{vRT}{6\pi(p_0 + \rho gh)}};$$

$$D = f(T, h); \Rightarrow \text{А и Б};$$

**С3.** Давление газа в сосуде при температуре 400 К составляло  $1,5 \cdot 10^6$  Па. При охлаждении сосуда до 100 К его объем уменьшился на 2%, при этом давление стало равным  $3,5 \cdot 10^5$  Па. Во сколько раз это значение больше значения давления, рассчитанного в модели идеального газа, подчиняющегося уравнению Менделеева—Клапейрона? Ответ округлите до сотых.

**Решение**

$$\begin{cases} p_1 V_1 = \nu RT_1; \\ p_2 0,98 V_1 = \nu RT_2; \end{cases} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1 T_2}{0,98 T_1} = \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 100}{0,98 \cdot 400} \approx 3,83 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\frac{p_{2(\text{Теор})}}{p_{2(\text{Эксп})}} = \frac{3,83}{3,5} \approx 1,09.$$



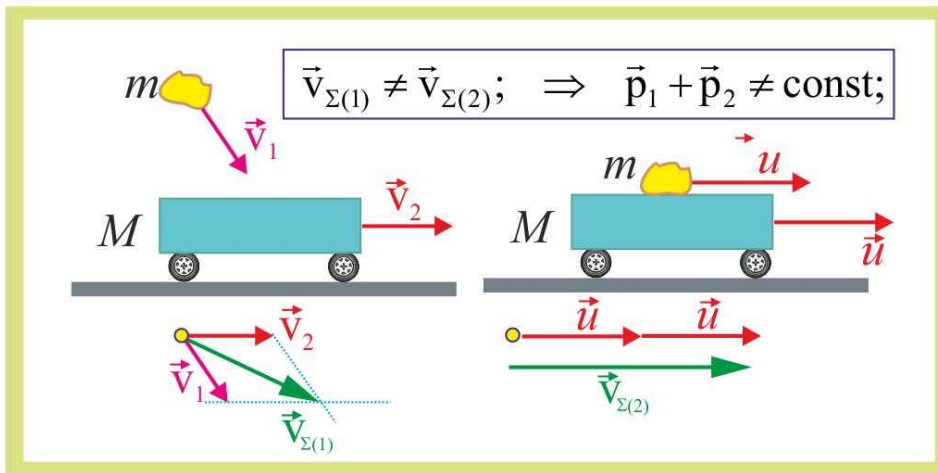
**Физические законы и границы  
их применимости**

**A11.** Всегда ли в инерциальных системах отсчета можно применять законы сохранения механической энергии и импульса замкнутой системы тел, на которые не действуют внешние силы?

- 1) Всегда можно применять оба закона.
- 2) Закон сохранения механической энергии можно применять всегда, закон сохранения импульса — не всегда.
- 3) Закон сохранения импульса можно применять всегда, закон сохранения механической энергии — не всегда.
- 4) Оба закона можно применять не всегда.

**Решение**

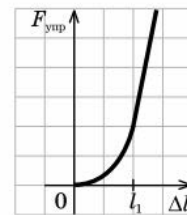
1. Ограничений на применение закона сохранения энергии не существует, а закон сохранения импульса ввиду его векторного характера в ряде случаев не исполняется:



**A12.** На рисунке показан график зависимости силы упругости бельевой резинки от изменения ее длины  $\Delta l$ . При каких значениях изменения длины  $\Delta l$  соблюдается закон Гука о пропорциональности силы упругости резинки ее удлинению?

- 1) при всех значениях  $\Delta l$
- 2) при  $\Delta l$  больше  $l_1$
- 3) ни при каких значениях  $\Delta l$
- 4) при  $\Delta l$  меньше  $l_1$

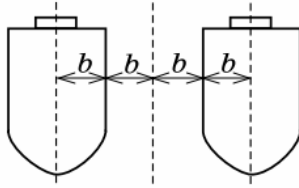
Ответ:



**Решение**

1. Закон Гука  $F_{\text{упр}} = k\Delta l$  справедлив только в линейной области зависимости  $F_{\text{упр}} = f(\Delta l) \Rightarrow$  при  $\Delta l > l_1$ ;

- A13.** По какой из приведенных формул можно рассчитать силу гравитационного притяжения между двумя кораблями одинаковой массы  $m$  (рис.)?



---

1)  $F = \frac{Gm^2}{b^2}$

2)  $F = \frac{Gm^2}{4b^2}$

3)  $F = \frac{Gm^2}{16b^2}$

- 4) ни по одной из указанных формул

### Решение

1. Закон гравитационного взаимодействия справедлив для расстояний между взаимодействующими телами много превышающими размеры тел, т.е. по сути, закон справедлив для точечных масс. В приведенном примере необходимо учитывать взаимодействие элементарных масс между собой. Формулы некорректны.

---

- C4.** Какой постулат специальной теории относительности противоречит классической механике и в чем состоит это противоречие?

### Решение

1. Теоретические разработки Лоренца и Пуанкаре, компилированные Эйнштейном, относились исключительно к уравнениям Максвелла, Герца, Хевисайда. В частности, для соответствия электродинамических соотношений (электромагнитных волн) с принципом относительности Галилея, Лоренц предложил формальные преобразования, которыми координатам, времени и массе приписывались не совсем привычные для классических представлений свойства, но всё это для электромагнитного поля и не более того.

2. Распространив теорию электромагнитного поля на вещественные объекты, Эйнштейн поставил в основу всей своей теории невозможность достижения скорости света. Хилый, скажем, постулат в контексте, например, бозона Фикса

3. В настоящее время не является секретом, что формула  $E=mc^2$  исторически не была впервые представлена А.Эйнштейном, хотя она стала символом Теории относительности. Очевидно, следует внести ясность в это заблуждение, и во всех учебниках и руководствах по физике исключить авторское право А.Эйнштейна и написать, что формулу  $E=mc^2$  была разработана независимо Дж.Дж.Томпсоном и Оливером Хевисайдом.

4. В настоящее время физика находится в системном кризисе. В теоретической физике продолжают накапливаться противоречия, деликатно именуемые «парадоксами», которые носят фундаментальный характер и являются серьезным тормозом в дальнейшем развитии фундаментальной и прикладной науки.

---

## Принцип соответствия

**A14.** Между какими парами теорий существует соотношение, определяемое принципом соответствия?

А. классическая механика — специальная теория относительности

Б. классическая механика — квантовая механика

1) только А

2) только Б

3) и А, и Б

4) ни А, ни Б

### Решение

1. Принцип соответствия, в современном его содержании, был сформулирован Нильсом Бором в 1923 г., когда физики столкнулись с ситуацией, что рядом со старыми, давно оправдавшими себя теориями (например, с механикой Ньютона), появились новые теории (электродинамика Максвелла, Герца, Хевисайда), описывающие ту же область действительности, но для иных объектов. Принцип соответствия утверждает преемственность физических теорий, в частности, то, что никакая новая теория не может быть справедливой, если она не содержит в качестве предельного случая старую теорию, относящуюся к тем же явлениям, поскольку старая теория уже оправдала себя в своей области:

$$A \Leftrightarrow B;$$

**A15.** Выберите правильную причинно-следственную цепочку событий:

А. экспериментальное открытие электромагнитных волн

Б. теоретическое описание распространения электромагнитных волн

В. изобретение радио

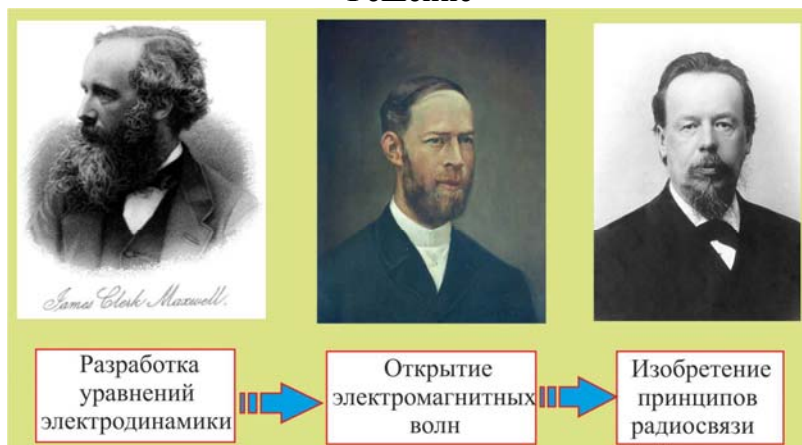
1) А — Б — В

2) А — В — Б

3) Б — А — В

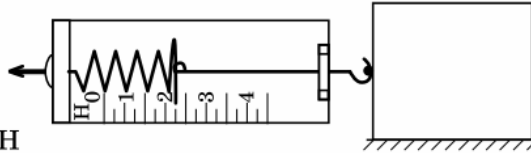
4) Б — В — А

### Решение



## Измерение физических величин

- A17.** Под действием пружины динамометра брусок движется равномерно по поверхности стола (рис.). По показаниям динамометра ученики могут записать значение действующей силы. Какая запись наиболее правильная?



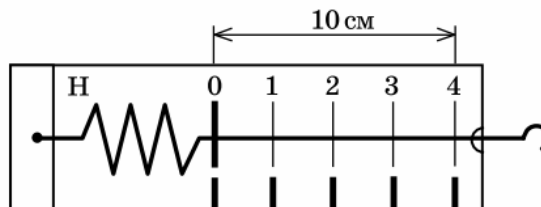
- 1) 1,70 Н
- 2)  $(1,75 \pm 0,25)$  Н
- 3)  $(1,70 \pm 0,01)$  Н
- 4)  $(2 \pm 1)$  Н

### Решение

1. Цена деления динамометра составляет  $\Delta f \approx 0,25$ Н, показания динамометра –  $F \approx 1,75$ Н, наиболее правильная запись:

$$F \approx (1,75 \pm 0,25)\text{Н};$$

- A18.** На рисунке представлен школьный лабораторный динамометр. Закон Гука для пружины динамометра имеет вид:  $F = 40|x|$  (все единицы даны в СИ). Чему равна сила упругости пружины динамометра при деформации 20 см?

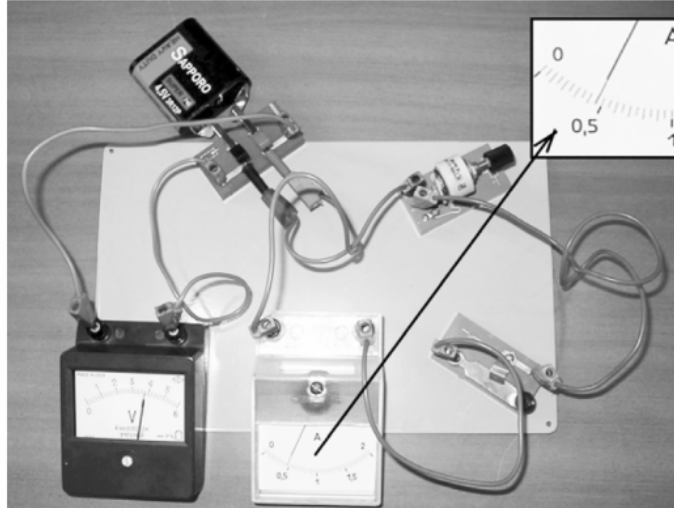


- 1)  $F = 0,8$  Н
- 2)  $F = 8$  Н
- 3)  $F = 80$  Н
- 4) При такой деформации динамометр будет давать неверные показания или будет испорчен.

### Решение

1. Коэффициент упругости пружины динамометра  $k = 40$  Н/м, при деформации пружины на  $\Delta x = 0,2$  м, теоретическое значение силы упругости в соответствии с законом Гука должно составлять  $F \approx 8$  Н, однако пределы измерений данного устройства не дают возможности эти показания получить. А дальше начинается философия, сломается ограничитель под действием экспериментатора или нет.

- A19.** На рисунке приведена электрическая цепь, собранная учеником. В паспорте амперметра, включенного в цепь, указано, что абсолютная погрешность амперметра на любом участке шкалы не превосходит цены деления. Какая запись результатов измерения будет верна?



- 1)  $(0,45 \pm 0,10)$  А; относительная погрешность измерения силы тока 22%
- 2)  $(0,45 \pm 0,05)$  А; относительная погрешность измерения силы тока 11%
- 3)  $(3,8 \pm 0,1)$  А; относительная погрешность измерения силы тока 3%
- 4)  $(0,49 \pm 0,01)$  А; относительная погрешность измерения силы тока 2%

#### Решение

1. Цена деления прибора  $\Delta I \approx 0,05$  А равна абсолютной погрешности.
2. Показания прибора:  $I \approx 0,45$  А, поэтому правильная запись измерения силы тока

$$I = (0,45 \pm 0,05) \text{ А};$$

3. Относительная погрешность:

$$\delta = \frac{\Delta I}{I} = \frac{0,05}{0,45} \approx 0,11 (11\%);$$

#### Погрешности измерения

- A20.** Какой из факторов, влияющих на точность измерений, включается в погрешность измерения физической величины?

- А. погрешность прибора
  - Б. погрешность процедуры измерения
- 1) только А
  - 2) только Б
  - 3) и А, и Б
  - 4) ни А, ни Б

### Решение

1. Инструментальными (приборными или аппаратурными) погрешностями средств измерений называются такие, которые принадлежат данному средству измерений, могут быть определены при его испытаниях и занесены в его паспорт.

2. Однако, кроме инструментальных погрешностей, при измерениях возникают ещё и такие погрешности, которые не могут быть приписаны данному прибору, не могут быть указаны в его паспорте и называются методическими, т. е. связанными не с самим прибором, а с методом проведения измерений.

3. Очень часто причиной возникновения методической погрешности является то, что, организуя измерения, нередко измеряют или вынуждены измерять не ту величину, которая в принципе должна быть измерена, а некоторую другую, близкую, но не равную ей.

**A21.** Дана физическая величина  $(\bar{a} \pm \Delta a)$ . Относительная погрешность величины  $a$  равна

1)  $\frac{\Delta a}{a}$       2)  $\frac{2\Delta a}{a}$       3)  $\left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2$       4)  $\frac{4\Delta a}{a}$

### Решение

$$\delta_x = \frac{\Delta X}{X} \equiv \frac{\Delta a}{\bar{a}};$$

**B1.** Сила тока в цепи равна  $(2,0 \pm 0,1)$ . Чему равна относительная погрешность измерения силы тока?

### Решение

$$\delta = \frac{\Delta I}{I} = \frac{0,1}{2} = 0,05 (5\%);$$

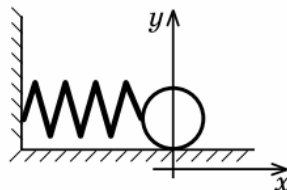
**B2.** Относительная ошибка измерения ребра куба 2%. Какова примерно относительная погрешность при вычислении его объема по длине ребра?

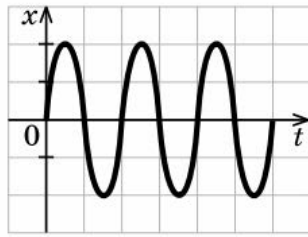
### Решение

$$\delta_v = \delta_a \cdot \delta_a \cdot \delta_a = \delta_a^3 = 8\%;$$

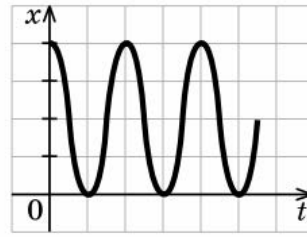
### Построение графика по результатам эксперимента

**A22.** На рисунке показана система, в которой груз на пружине может совершать колебания, и система отсчета, в которой описывается это движение. На каком из графиков приведен график зависимости координаты тела от времени, если в начальный момент времени груз толкнули так, что он начал двигаться вправо?

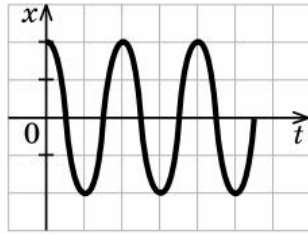




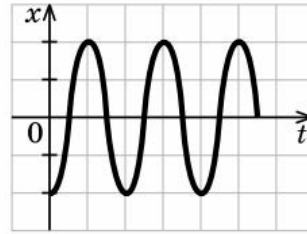
1)



2)



3)



4)

### Решение

1. В начальный момент времени смещение  $x = 0$ , т.е. уравнение колебаний;

$$x(t) = x_{\max} \sin \omega t = x_{\max} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right),$$

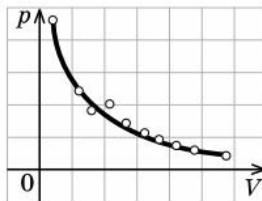
что соответствует график 1.

---

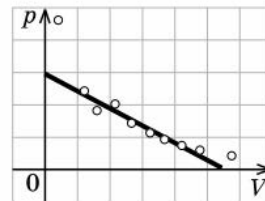
**A23.** При исследовании зависимости давления газа от объема были получены некоторые данные. Какой график построен правильно по экспериментальным точкам?



A



B



B

- 1) график А
- 2) график Б
- 3) график В
- 4) ни один из приведенных

### Решение

1. Очевидно, что исследовался изотермический процесс расширения газа

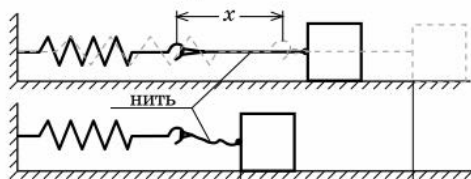
$$pV = \text{const}; \Rightarrow p \sim \frac{1}{V},$$

чему всецело соответствует график Б.

---

**A24.** С использованием пружины, бруска и нити (рис. а) исследовалась зависимость тормозного пути  $S_T$  от растяжения пружины  $x$ . Результаты исследования представлены на рисунке б. В каких координатах следует перестроить график, чтобы графиком зависимости оказалась прямая?

- 1)  $S_T - x^2$
- 2)  $S_T - x^3$
- 3)  $S_T - \sqrt{x}$
- 4)  $S_T - \frac{l}{x}$



Ответ:

Рис. а

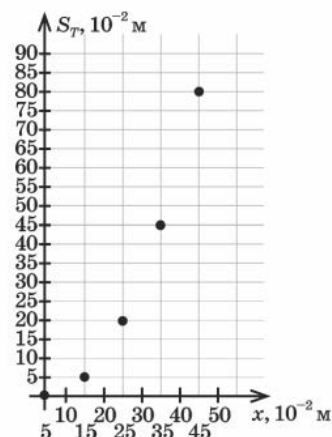


Рис. б

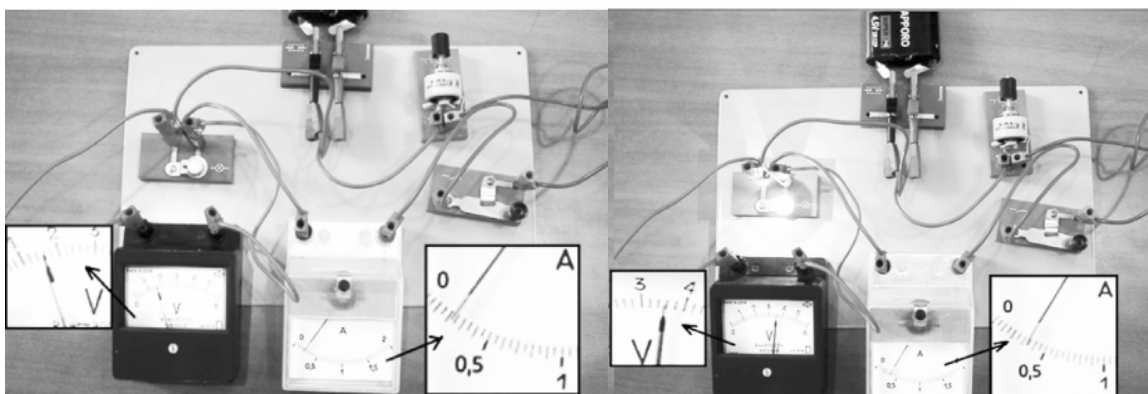
### Решение

1. Поскольку заданная зависимость, судя по виду графика, квадратичная функция (ну очень похожа), хотя данные вертикальной оси таковой не соответствуют, например: при  $x = 25$ -см при квадратичной зависимости  $S_T \approx 6,25$  см, но не как ни 20 см, получается, таким образом,

$$x^\xi = S_T; \quad 25^\xi = 20; \quad 2^\xi = 1,6; \quad \Rightarrow \quad \xi \approx 0,215;$$

для  $x = 45$ ,  $2^\xi = 3,56$ ;  $\xi = 0,551$  и так далее, а смысл?

**A25.** На рисунках приведены фотографии электрической цепи, собранной учениками для исследования особенностей прохождения тока через лампочку. Что можно сказать о зависимости сопротивления лампочки от силы тока?



- 1) Сопротивление растёт с ростом силы тока.
- 2) Сопротивление уменьшается с ростом силы тока.
- 3) Сопротивление не зависит от силы тока.
- 4) Приведенные данные не позволяют сделать определенного вывода о наблюдаемой зависимости из-за большой погрешности измерений.



### Решение

1. При различных значениях силы тока нить накала лампочки будет иметь разную температуру, от величины которой и зависит сопротивление спирали. Поскольку при работе установки лампочка одна и та же, то говорить можно только на качественном уровне, что:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= I_1 U_1 \approx 1,6 \cdot 0,25 \approx 0,42 \text{ Вт}; \\ P_2 &= I_2 U_2 \approx 3,6 \cdot 0,75 \approx 2,7 \text{ Вт}; \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_2 > T_1; \quad R_2 < R_1;$$

Влияние же погрешностей измерений просматривается весьма смутно.

### Использование результатов экспериментов для предсказаний значений величин, характеризующих изучаемое явление

**A26.** В двух комнатах квартиры показания сухих термометров психрометра одинаковы, а показания влажных — отличаются и от показаний сухого и различаются между собой. Если показания влажного термометра выше в первой комнате, то влажный платок

- 1) высохнет быстрее в первой комнате
- 2) высохнет быстрее во второй комнате
- 3) высохнет за одно и то же время в обеих комнатах
- 4) не высохнет в первой комнате, если показания психрометра в ней не изменятся

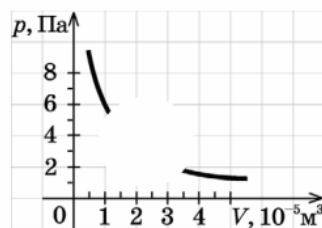
### Решение

1. Интенсивность испарения в данном случае, при постоянстве температуры в комнатах, будет зависеть от влажности воздуха. Чем ближе значение давления водяного пара к давлению насыщенных паров, тем интенсивность испарения будет меньше. Во второй комнате влажность ниже, бельё будет сохнуть быстрее.

**A27.** При проведении исследования построен график зависимости давления некоторой массы идеального газа от его объема (рис.) На копии график пропечатался не полностью. Какой объем, скорее всего, занимал газ при давлении 2,5 Па?

- 1)  $2,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
- 2)  $3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
- 3)  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$
- 4)  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$

Ответ:



### Решение

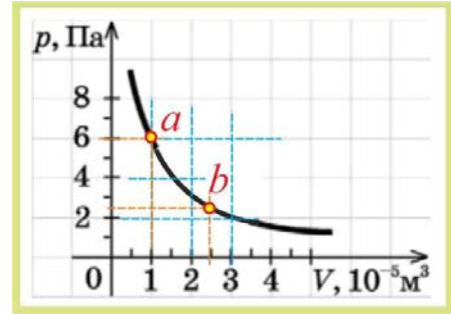
1. Судя по заданному графику, процесс изменения состояния газа изотермический:

$$\left. \begin{aligned} p_1 V_1 &= \nu RT; \\ p_2 V_2 &= \nu RT; \end{aligned} \right\} \Rightarrow p_1 V_1 = p_2 V_2; \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 V_1}{p_2};$$

2. Выбирая на графике точку с известными макропараметрами, например а, можно найти требуемый объём газа

$$V_b = \frac{p_a V_a}{V_b} \approx \frac{6 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-5}} \approx 2,5 \text{ Па};$$

3. К такому же результату можно прийти, построив недостающую часть изотермы.



**A28.** Если измерить плотность неизвестного газа  $\rho$  при заданном давлении  $p$ , то, пользуясь величинами  $p$  и  $\rho$ , можно рассчитать

- 1) среднюю скорость хаотического движения его молекул
- 2) концентрацию молекул газа
- 3) массу молекул газа
- 4) молярную массу газа

**Решение**

$$p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2; \Rightarrow \bar{v} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}};$$

**A29.** Один ученик измерил линейкой ребро кубика и определил, что оно равно  $(5 \pm 0,1)$  см. После этого он вычислил объём кубика. Второй ученик измерил объём того же кубика мерным цилиндром и получил результат  $(124 \pm 2)$  мл.

Какое из утверждений верно? Результаты измерения двух учеников в пределах ошибок измерений

- 1) совпадают, но у второго результат более точен
- 2) совпадают, но у первого результат более точен
- 3) не совпадают, и результат у первого более точен
- 4) не совпадают, и результат у второго более точен

**Решение**

$$V_1 = [(5 \pm 0,1)10^{-2}]^3 \approx (1,25 \cdot 10^{-4} \pm 10^{-3})\text{м}^3;$$

$$V_2 \approx (1,24 \cdot 10^{-4} \pm 2 \cdot 10^{-6})\text{м}^3;$$

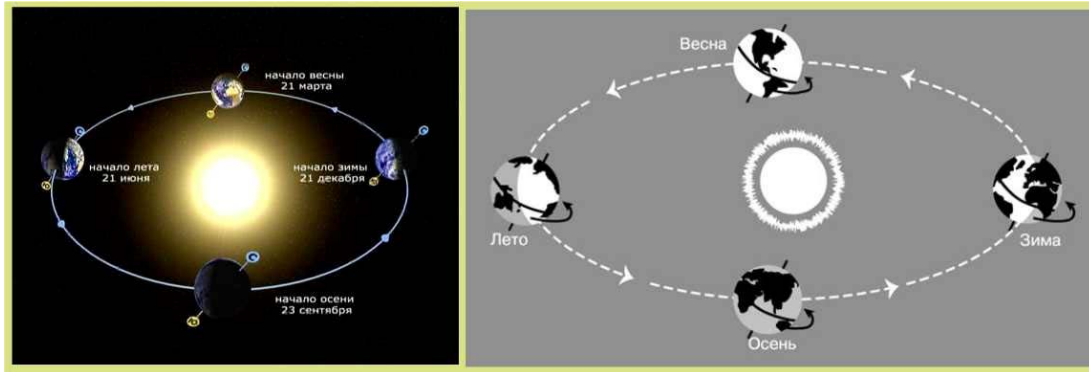
### Физическая картина мира

**A30.** Чем объясняется смена времен года на Земле?

- 1) периодическими изменениями скорости вращения Земли вокруг своей оси
- 2) периодическими изменениями скорости движения Земли вокруг Солнца
- 3) отклонением от  $90^\circ$  угла между осью вращения Земли и плоскостью земной орбиты
- 4) периодическими изменениями направления движения морских течений и циклонов

## Решение

1. Смена времен года происходит благодаря двум факторам: во-первых, это движение Земли вокруг Солнца по эллиптической орбите, во-вторых, это не прямой угол между земной орбитой и солнечными лучами. Не будь одного из этих двух факторов — на Земле никогда не сменялись бы времена года.



2. В 17 веке гелиоцентрическая модель мира благодаря стараниям Николаса Коперника, Тихо Браге, Галилео Галилея, Джордано Бруно и др. окончательно вытеснила геоцентрическую модель. Развитие астрономии и наблюдение за планетами сделали абсурдным утверждение о вращении Мира вокруг Земли.

3. Земля оборачивается вокруг Солнца за один год, при этом на ней происходит смена времён года. Причина этого в наклоне земной оси. Ось вращения нашей планеты (и это мы видим на глобусе) наклонена под углом  $23,5^\circ$ . При этом она всегда "смотрит" в одну точку неба, рядом с которой находится Полярная звезда, создавая впечатление, что небесная сфера вращается вокруг этой точки. Наклон земной оси приводит к тому, что полгода земля наклонена к Солнцу Северным полушарием, а полгода - отвёрнута Северным и обращена Южным. Это приводит к тому, что высота Солнца над горизонтом из месяца в месяц меняется - зимой оно поднимается невысоко, тепла мы получаем мало, и становится холодно. Зато на противоположном полушарии в этот момент лето - оно повернуто к Солнцу, через полгода лето наступает у нас. Солнце поднимается над горизонтом всё выше и прогревает нашу половину Земли, правда, с другой стороны планеты наступает зима.

4. Вращение Земли вокруг Солнца, таким образом, приводит к смене времён года, благодаря постоянному наклону земной оси  $23,5^\circ$ .

**А31.** Известно, что Земля, на которой установлены законы сохранения механической энергии и импульса, движется относительно Солнца со скоростью 30 км/с. Марс удален от Солнца на большее расстояние и движется вокруг Солнца со скоростью 25 км/с. Если бы существовала марсианская цивилизация, то марсианские законы сохранения энергии и импульса

- 1) совпадали бы с земными, однако в законе сохранения импульса пришлось бы учитывать дополнительный импульс всех тел
- 2) были бы точно такие же
- 3) были бы иные, учитывали бы большую скорость Земли по сравнению со скоростью Марса
- 4) были бы иные, учитывали бы большее расстояние от Марса до Солнца по сравнению с расстоянием от Земли до Солнца

### Решение

1. Если системы координат связать с планетами, то их можно считать инерциальными, т.е. все законы механики в них будут исполняться одинаково.

---

**А32.** Тело  $A$  движется в системе отсчета, связанной с телом  $B$ , прямолинейно с постоянной скоростью  $v$ , близкой к скорости света. Тело  $C$  движется вдоль той же прямой с такой же по модулю скоростью навстречу первому. Измерения в системе отсчета, связанной с телом  $A$ , покажут, что скорость тела  $C$  равна

- 1) 0
- 2)  $2v$
- 3)  $\frac{2v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$
- 4)  $\frac{2v}{1 + \frac{v^2}{c^2}}$

### Решение

1. В соответствии с преобразованиями Лоренца:

$$v_{\Sigma} = \frac{v + v}{1 + \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2v}{1 + \frac{v^2}{c^2}};$$

---

**А33.** Законы Ньютона нельзя применять при расчете движения.

- 1) планет вокруг Солнца
- 2) ракеты в космическом пространстве
- 3) электронов в кинескопе телевизора
- 4) электронов в атоме

### Решение

1. Принято считать, что поведение электронных облаков в атомах подчиняется квантовым законам. Законы Ньютона в масштабах атомного уровня считаются некорректными.

---

**А34.** Имеются источник  $A$  постоянного тока с напряжением 100 В и источник  $B$  переменного тока с напряжением 220 В. Какой из этих источников может представлять опасность для жизни человека?

- 1) только  $A$
- 2) только  $B$
- 3) и  $A$ , и  $B$
- 4) ни  $A$ , ни  $B$

### Решение

1. Оба источника несут угрозу здоровью. Степень угрозы определяется, по какому пути потечёт ток в организме.

---

**А35.** Размер атомов около  $10^{-10}$  м. В модели атома Э. Резерфорда размер ядра равен примерно

1)  $10^{-10}$  м

2)  $10^{-12}$  м

3)  $10^{-13}$  м

4)  $10^{-15}$  м

### Решение

1. 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.

4. Получалось, что **в межатомном пространстве есть некие пустоты**, через которые и просачиваются пронырливые 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 структура, 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.

5. 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 шefa, 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.

6. 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.

7. 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.

8. С этого момента стало очевидным, что ядра всех атомов состоят из  $Z$  протонов  $p$  и  $N$  нейтронов  $n$ . Пары протонов и нейтронов стали называть **нуклонами**, число нуклонов в ядре равно  $A = Z + N$ .

9. 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

$$R_{\min} \approx \frac{2e \cdot Ze}{4\pi\epsilon_0 W_\alpha} \approx 5 \cdot 10^{-14} \text{ м.}$$

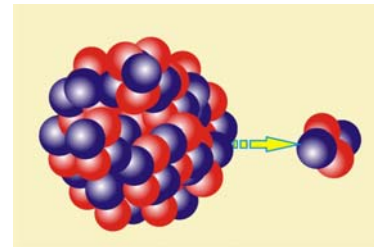
10. Это расстояние оказалось на четыре порядка меньше размеров всего атома, что говорило о невообразимо большой плотности ядерного вещества. Так, например, для золота ( $A_{\text{Au}} \cong 197$ ) плотность ядра определится как

$$\rho_N = \frac{M}{V} = \frac{A \cdot m_n}{\frac{4}{3}\pi R_{\min}^3} \cong \frac{196 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}}{4 \cdot (5 \cdot 10^{-14})^3} \approx 10^{15} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

11. 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.

12. 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. Из этого следовало, что  $\alpha$  – частицы входят в состав ядер. Используя гипотезу де Бройля можно определить длину волны, соответствующей этой частице

$$\lambda_\alpha = \frac{h}{\sqrt{2m_\alpha W_\alpha}} \cong 6 \cdot 10^{-15} \text{ м,}$$



Ядро и  $\alpha$  – частицы

т.е. длина волны де Бройля сопоставима с размерами ядра, что говорит о квантовой принадлежности ядерных характеристик. Протоны и нейтроны близки по массе

$$m_p \cong 1,67239 \cdot 10^{-27} \text{ кг; } p \cong + 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл; } m_n \cong 1,67460 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$