

# 10

« , 10 » \ , . . .  
, . : « » , 2000 .

# СОДЕРЖАНИЕ

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

<b>Глава I</b> <b>Основы молекулярно-кинетической теории</b> <i>Упражнение 1</i> .....	5
<b>Глава II</b> <b>Температура. Энергия теплового движения молекул</b> <i>Упражнение 2</i> .....	14
<b>Глава III</b> <b>Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы</b> <i>Упражнение 3</i> .....	20
<b>Глава IV</b> <b>Взаимные превращения жидкостей и газов</b> <i>Упражнение 4</i> .....	33
<b>Глава V</b> <b>Твердые тела</b> <i>Упражнение 5</i> .....	41
<b>Глава VI</b> <b>Основы термодинамики</b> <i>Упражнение 6</i> .....	48

## ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

<b>Глава VII</b> <b>Электростатика</b> <i>Упражнение 7</i> .....	67
<b>Глава VIII</b> <b>Законы постоянного тока</b> <i>Упражнение 8</i> .....	73

<b>Глава IX</b>	
<b>Магнитное поле</b>	
<i>Упражнение 9</i> .....	83
<b>Глава X</b>	
<b>Электрический ток в различных средах</b>	
<i>Упражнение 10</i> .....	90
<i>Упражнение 11</i> .....	102
<i>Упражнение 12</i> .....	105
<b>ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ</b>	
Лабораторная работа №1 .....	112
Лабораторная работа №2.....	115
Лабораторная работа №3.....	117
Лабораторная работа №4.....	119
Лабораторная работа №5.....	121
Лабораторная работа №6.....	123
Лабораторная работа №7.....	124
<b>СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ</b> .....	126

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## ТЕПЛОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

### Глава I. Основы молекулярно-кинетической теории

#### Упражнение 1.

1.

Какую площадь может занять капля оливкового масла объемом  $0,02 \text{ см}^3$  при расплывании ее на поверхности воды?

**Дано:**

$$\begin{aligned}M &= 2,7 \text{ кг/моль} \\ \rho &= 920 \text{ кг/м}^3 \\ N_A &= 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \\ V &= 0,02 \text{ см}^3 = \\ &= 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3\end{aligned}$$

**Решение:**

Минимальная толщина пленки равна диаметру молекулы оливкового масла  $d$ .

$$\text{Соответственно, } V = S_{\max} \cdot d, S_{\max} = \frac{V}{d}.$$

Оценим диаметр молекулы масла:

$d = \sqrt[3]{V_0}$ , где  $V_0$  – объем, приходящийся на одну молекулу.

$S_{\max}$  - ?

$$V_0 = \frac{V}{N}, N = N_A \frac{m}{M}; V_0 = \frac{V \cdot M}{N_A \cdot m},$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{V \cdot M}{N_A \cdot m}}, \rho = \frac{m}{V};$$

$$\begin{aligned}d &= \sqrt[3]{\frac{M}{N_A \cdot \rho}} = \sqrt[3]{\frac{2,7 \text{ кг/моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 920 \text{ кг/м}^3}} = \sqrt[3]{\frac{2,7}{6 \cdot 10^{23} \cdot 9,2 \cdot 10^2}} \text{ м} = \\ &= 1,7 \cdot 10^{-9} \text{ м},\end{aligned}$$

$$S_{\max} = \sqrt[3]{\frac{N_A \cdot \rho}{M}} \cdot V,$$

$$S_{\max} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 920 \text{ кг} / \text{м}^3}{2,7}} \cdot 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 9,2 \cdot 10^2}{2,7}} \cdot 2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 = 11,8 \text{ м}^2, S_{\max} = 11,8 \text{ м}^2.$$

Замечание. В § 1 учебника размер молекулы оливкового масла уже вычислен, поэтому для определения площади капли  $S_{\max}$

можно пользоваться формулой  $S_{\max} = \frac{V}{d}$ .

$$S_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3}{1,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 11,8 \text{ м}^2.$$

## 2.

*Определите молярные массы водорода и гелия.*

**Дано:**

**Решение:**

Вспользуемся таблицей Менделеева, в которой указаны относительные атомные массы химических элементов.

$M_{\text{H}_2}$  - ?

$M_{\text{He}}$  - ?

Относительная атомная масса водорода  $M_{\text{H}}$  равна 1, а гелия  $M_{\text{He}}$  = 4. Химическая формула водорода  $\text{H}_2$ , поэтому относительная молекулярная масса водорода  $M_{\text{r H}_2} = 2 \cdot 1$ . Соответственно, молярная масса водорода равна  $M_{\text{r H}_2} = 10^{-3}$ .  $M_{\text{r H}_2} \text{ кг/моль} = 10^{-23} \cdot 2 \text{ кг/моль} = 0,002 \text{ кг/моль}$ . Гелий – инертный одноатомный газ, следовательно  $M_{\text{He}} = 10^{-3} \cdot M_{\text{He}} \text{ кг/моль} = 10^{-3} \cdot 4 \text{ кг/моль} = 0,004 \text{ кг/моль}$ .

### 3.

Во сколько раз число атомов в 12 кг углерода превышает число молекул в 16 кг кислорода?

**Дано:**

$$\begin{aligned}m_C &= 12 \text{ кг} \\M_C &= 12 \text{ г/моль} = \\&= 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль} \\m_{O_2} &= 16 \text{ кг} \\M_{O_2} &= 16 \text{ кг/моль} \\&= 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}\end{aligned}$$

**Решение:**

$N = \nu N_A$ ,  
Где  $N$  – количество атомов или молекул данного вещества,  $\nu$  – количество вещества, выраженное в молях,  $N_A$  – количество атомов или молекул в 1 моле вещества.

$$\nu = \frac{m}{M},$$

где  $m$  – масса вещества,  $M$  – молярная масса.

---

$$\frac{N_C}{N_{O_2}} = ?$$

$$N = N_A \frac{m}{M}; N_C = N_A \frac{m_C}{M_C},$$

$$N_{O_2} = N_A \cdot \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}}.$$

Молярная масса молекулярного кислорода  $O_2$  связана с молярной массой атомарного кислорода по формуле:  $M_{O_2} = 2 \cdot M_O$ .

$$\frac{N_C}{N_{O_2}} = \frac{m_C \cdot 2M_O}{m_{O_2} \cdot M_C},$$

$$\frac{N_C}{N_{O_2}} = \frac{2 \cdot 12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}}{16 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}},$$

$$\frac{N_C}{N_{O_2}} = 2.$$

Число атомов в 12 кг углерода в 2 раза больше числа молекул в 16 кг кислорода.

4.

Каково количество вещества (в молях), содержащегося в 1 г воды?

**Дано:**

$$M_{H_2O} = 1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$$

$$M_H = 1 \text{ г/моль} = 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M_O = 16 \text{ г/моль} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

---

$\nu$  - ?

$$\nu = \frac{10^{-3}}{10^{-3}(2+16)} \text{ моль};$$

**Решение:**

$$\nu = \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}}.$$

Химическая формула воды  $H_2O$ , поэтому

$$M_{H_2O} = 2M_H + M_O.$$

$$\nu = \frac{m_{H_2O}}{2M_H + M_O},$$

$$\nu = \frac{1}{18} \text{ моль} \approx 0,056 \text{ моль}.$$

5.

Чему равно число молекул в 10 г кислорода?

**Дано:**

$$M_O = 16 \text{ г/моль} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$m = 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг}$$

---

$N_{O_2}$  - ?

**Решение:**

Воспользуемся формулой 1.8 § 2 учебника.

$$N_{O_2} = N_A \frac{m_{O_2}}{M_{O_2}};$$

$$M_{O_2} = 2M_O,$$

$$N_{O_2} = \frac{6 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-2}},$$

$$N_{O_2} \approx 1,88 \cdot 10^{23} \text{ молекул}.$$

## 6.

Молярная масса азота равна 0,028 кг/моль. Чему равна масса молекулы азота?

**Дано:**

$$M_{N_2} = 0,028$$

кг/моль

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$m_{ON_2} = ?$$

**Решение:**

$$m_0 = \frac{m}{N}, \text{ где } m_0 - \text{масса одной молекулы,}$$

$m$  – масса всего вещества,

$N$  – число молекул вещества.

$$N = N_A \frac{m}{M};$$

$$m_0 = \frac{m \cdot M}{N_A \cdot m},$$

$$m_0 = \frac{M}{N_A};$$

$$m_{0N_2} = \frac{M_{N_2}}{N_A};$$

$$m_{0N_2} = \frac{0,028}{6 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = \frac{2,8 \cdot 10^{-2}}{6 \cdot 10^{23}} \text{ кг} = 0,465 \cdot 10^{-25}.$$

$$m_0 = 4,65 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

## 7.

Определите число атомов в 1 м<sup>3</sup> меди. Молярная масса меди  $M = 0,0635$  кг/моль, ее плотность  $\rho = 9000$  кг/м<sup>3</sup>.

**Дано:**

$$V_{Cu} = 1 \text{ м}^3$$

$$M_{Cu} = 0,0635 \text{ кг/моль}$$

$$\rho_{Cu} = 9000 \text{ кг/м}^3$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

**Решение:**

$$N = \nu N_A,$$

$$\nu = \frac{m}{M},$$

$$m = \rho V,$$

$N_{Cu} - ?$

$$\left| \begin{array}{l} v = \frac{\rho V}{M}, \\ N = \frac{\rho V}{M} N_A; \end{array} \right.$$

$$N_{Cu} = \frac{\rho_{Cu} V_{Cu}}{M_{Cu}} N_A,$$

$$N_{Cu} = \frac{9000 \cdot 1}{0,0635} \cdot 6 \cdot 10^{23} = \frac{9 \cdot 10^3}{6,35 \cdot 10^{-2}} 6 \cdot 10^{23};$$

$$N_{Cu} \approx 8,5 \cdot 10^{28} \text{ молекул.}$$

$$[N] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{моль}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг}} \cdot \frac{\text{молекул}}{\text{моль}} \right] = [\text{молекул}]$$

## 8.

Плотность алмаза  $3500 \text{ кг/м}^3$ . Какой объем займут  $10^{22}$  атомов этого вещества?

**Дано:**

$$\rho_{ал} = 3500 \text{ кг/м}^3$$

$$N_{ал} = 10^{22} \text{ атомов}$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$M_C = 12 \text{ г/моль} = 0,012 \text{ кг/моль}$$

**Решение:**

Найдем объем алмаза по формуле:

$$V = \frac{m}{\rho_{ал}},$$

$$m = v \cdot M,$$

где  $m$  – масса алмаза,  $v$  – количество вещества,  $M$  – молярная масса вещества.

$V - ?$

$M = M_C$ , так как алмаз состоит из атомов углерода.

$$v = \frac{N_{ал}}{N_A},$$

где  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $N_{ал}$  – число молекул в веществе.

$$m = M_C \frac{N_{al}}{N_A}, \quad V = \frac{M_C \cdot N_{al}}{N_A \cdot \rho_{al}};$$

$$v_{al} = \frac{1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{22}}{6 \cdot 10^{23} \cdot 3500} \text{ м}^3 = \frac{1,2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{22}}{6 \cdot 10^{23} \cdot 3,5 \cdot 10^3} \cdot \text{м}^3 = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3,$$

$$v_{al} = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3.$$

$$[v_{al}] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{кг}} \cdot \text{м}^3 \right] = [\text{м}^3]$$

## 9.

Как изменится давление газа, если концентрация его молекул увеличится в 3 раза, а средняя скорость молекул уменьшится в 3 раза?

**Дано:**

$$n = 3n_1$$

$$v_2 = \frac{1}{3}v_1$$

$$\frac{p_2}{p_1} = ?$$

**Решение:**

Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа для начального и конечного состояний газа.

$$p_1 = \frac{1}{3} m_0 n_1 v_1^{-2},$$

$$p_2 = \frac{1}{3} m_0 n_2 v_2^{-2},$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы газа,

$p_1$  и  $p_2$  – давление газа в начальном и конечном состоянии,

$n_1$  и  $n_2$  – концентрация газа (число молекул газа в единице объема),

$v_1^{-2}$  и  $v_2^{-2}$  – средние квадраты скорости молекул газа.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\frac{1}{3} m_0 n_2 v_2^{-2}}{\frac{1}{3} m_0 n_1 v_1^{-2}},$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{n_2 v_2^{-2}}{n_1 v_1^{-2}}.$$

По условию задачи  $n_2 = 3n_1$ ,  $\overline{v_2} = \frac{1}{3}\overline{v_1}$  или  $v_2^{-2} = \frac{1}{9}v_1^{-2}$ , где  $\overline{v_1}$ ,  $\overline{v_2}$  - среднеквадратичные скорости молекул.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{3n_1 \cdot \frac{1}{9}(\overline{v_1})^2}{n_1 \cdot (\overline{v_1})^2};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{1}{3}, \quad p_2 = \frac{1}{3}p_1.$$

Давление газа уменьшится в 3 раза.

## 10.

*Под каким давлением находится газ в сосуде, если средний квадрат скорости его молекул  $\overline{v^2} = 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , концентрация молекул  $n = 3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ , масса каждой молекулы  $m_0 = 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ ?*

**Дано:**

$$\begin{aligned} \overline{v^2} &= 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2 \\ n &= 3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3} \\ m_0 &= 5 \cdot 10^{-26} \text{ кг.} \end{aligned}$$

$p$  - ?

**Решение:**

Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа:

$$\rho = \frac{1}{3} m_0 n \overline{v^2},$$

$$\rho = \frac{1}{3} \cdot 5 \cdot 10^{-26} \cdot 3 \cdot 10^{25} \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\rho = 5 \cdot 10^5 \text{ Па} = 5 \text{ атм.}$$

$$[p] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3 \cdot \text{с}^2} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \frac{1}{\text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right] = [\text{Па}]$$

## 11.

В колбе объемом 1,2 л содержится  $3 \cdot 10^{22}$  атомов гелия. Какова средняя кинетическая энергия каждого атома? Давление газа в колбе  $10^5$  Па?

**Дано:**

$$\begin{aligned} V &= 1,2 \text{ л} = \\ &= 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ N &= 3 \cdot 10^{22} \text{ атомов} \\ P &= 10^5 \text{ Па} \end{aligned}$$

$$\overline{E} - ?$$

**Решение:**

$\overline{E}$  - средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.  
Согласно уравнению 1.15 § 8 учебника:

$$p = \frac{2}{3} n \overline{E},$$

Где  $n = \frac{N}{V}$  - концентрация газа.

$$\text{Поэтому } \overline{E} = \frac{3}{2} \frac{p}{n},$$

$$\overline{E} = \frac{3}{2} \frac{p \cdot V}{N};$$

$$\overline{E} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{22}} \text{ Дж},$$

$$\overline{E} = 6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

$$[E] = [\text{Па} \cdot \text{м}^3] = \left[ \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}]$$

## 12.

Вычислите средний квадрат скорости движения молекул газа, если его масса  $m = 6$  кг, объем  $V = 4,9 \text{ м}^3$  и давление  $p = 200$  кПа.

**Дано:**

$$\begin{aligned} m &= 6 \text{ кг} \\ V &= 4,9 \text{ м}^3 \\ p &= 200 \text{ кПа} = \\ &= 2 \cdot 10^5 \text{ Па} \end{aligned}$$

**Решение:**

Воспользуемся основным уравнением молекулярно-кинетической теории:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v^2, \text{ где } n - \text{ концентрация газа.}$$

$$v^{-2} = ? \quad \left| \quad v^{-2} = \frac{3p}{m_0 n}, n = \frac{N}{V}, \right.$$

Где  $N = \frac{m}{m_0}$  - количество молекул;

$$n = \frac{m}{V \cdot m_0}, \quad v^{-2} = \frac{3p \cdot V}{m},$$

$$v^{-2} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 4,9 \cdot \mathcal{M}^2}{6 \cdot c^2},$$

$$v^{-2} = 4,9 \cdot 10^5 \frac{\mathcal{M}^2}{c^2}.$$

$$[\mathcal{O}^2] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}} \right] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \right].$$

## Глава II. Температура. Энергия теплового движения молекул

### Упражнение 2.

1.

*Какое значение имела бы постоянная Больцмана, если бы единица температуры в СИ – кельвин – была равна не  $1^{\circ}\text{C}$ , а  $2^{\circ}\text{C}$ ?*

**Дано:**

$$T_v = \frac{T}{2}$$

**Решение:**

Единица температуры в СИ увеличилась в 2 раза, т.е. температуре, равной 2К в старых единицах, соответствует 1К в

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

новых единицах. Следовательно, старая и новая температуры связаны соотношением

$$k_v - ?$$

$$T_v = \frac{T}{2}$$

Температура – мера средней кинетической энергии молекул, так как  $\bar{E} = \frac{3}{2} \kappa T$ .  $\bar{E}$  измеряется в Джоулях и от изменения температурных единиц не зависит:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \kappa_v T_v = \text{const}, \text{ следовательно, } \kappa_v T_v = \kappa T.$$

$$\kappa_n = \kappa \frac{T}{T_n} = 2\kappa,$$

$$\kappa_v = 2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 2,76 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

## 2.

*Какова средняя кинетическая энергия атома аргона, если температура газа  $17^{\circ}\text{C}$ ?*

**Дано:**

$$t = 17^{\circ}\text{C}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$$\bar{E} - ?$$

**Решение:**

Средняя кинетическая энергия вычисляется по формуле 2.9 § 11 учебника:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \kappa T.$$

Учитывая, что  $T = 273 + t$ ,

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \kappa (273 + t).$$

$$\bar{E} = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (273 + 17)}{2} \text{ Дж} = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2,9 \cdot 10^2}{2} \text{ Дж};$$

$$\bar{E} = 6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

### 3.

Современные вакуумные насосы позволяют понижать давление до  $1,3 \cdot 10^{-10}$  Па ( $10^{-12}$  мм рт.ст.). Сколько молекул газа содержится в  $1 \text{ см}^3$  при указанном давлении и температуре  $27^\circ\text{C}$ ?

**Дано:**

$$p = 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ Па}$$

$$V = 1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$t = 27^\circ\text{C}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$N = ?$

**Решение:**

Зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры выражается формулой 2.10 § 11 учебника:

$$p = nkT, \text{ где } n = \frac{N}{V},$$

$$T = 273 + t, T = 300 \text{ К}.$$

$$p = \frac{N}{V} kT, N = \frac{pV}{kT}.$$

$$N = \frac{1,3 \cdot 10^{-10} \cdot 10^{-6}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = \frac{1,3 \cdot 10^{-16}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2},$$

$$N = 3,14 \cdot 10^4 \text{ молекул}.$$

$$[N] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot \text{К}} \right] = \left[ \frac{\frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3}{\frac{\text{Дж}}{\text{К}}} \right] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Дж}} \right] = [1]$$

### 4.

Где больше молекул: в комнате объемом  $50 \text{ м}^3$  при нормальном атмосферном давлении и температуре  $20^\circ\text{C}$  или в стакане воды объемом  $200 \text{ см}^3$ ?

**Дано:**

$$\begin{aligned}V_1 &= 50 \text{ м}^3 = 5 \cdot 10^3 \\T &= 20 \text{ }^\circ\text{C} = \\&= (273 + 20)\text{K} = 293 \text{ K} = \\&= 2,93 \cdot 10^2 \text{ K} \\p_1 &= 1 \cdot 10^5 \text{ Па} \\V_2 &= 200 \text{ см}^3 = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \\k &= 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \\ \rho_e &= 1000 \text{ кг} / \text{м}^3\end{aligned}$$

**Решение:**

Найдем  $N_1$  – число молекул в комнате.

$$p_1 = \frac{N_1}{V_1} kT,$$

$$N_1 = \frac{p_1 V_1}{kT};$$

$$N_1 = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 2,93 \cdot 10^2} \approx 1,24 \cdot 10^{27} \text{ мо.}$$

Найдем  $N_2$  – число молекул воды в стакане по формуле:

$$N_2 = \frac{m_r}{m_0},$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы воды.

---

$$N_1 \gg N_2$$

Химическая формула воды  $\text{H}_2\text{O}$ . Следовательно, относительная молекулярная масса воды равна  $M_r = 2 \cdot 1 + 16 = 18$ . Молярная масса воды равна  $M = 10^{-3} \cdot 18 \text{ кг/моль} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$ .

$$m_0 = \frac{M}{N_A};$$

$$m_2 = V_2 \cdot \rho_e,$$

$$N_2 = \frac{V_2 \cdot \rho_e}{M} \cdot N_A,$$

$$N_2 = \frac{2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^{-2}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \approx 6,7 \cdot 10^{24} \text{ молекул}$$

$$N_2 < N_1.$$

В комнате молекул больше, чем в стакане воды.

## 5.

*Средняя квадратичная скорость молекулы газа, находящегося при температуре  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ , равна  $540 \text{ м/с}$ . Определите массу молекулы.*

**Дано:**

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{v^{-2}} = 540 \text{ м/с} = 5,4 \cdot 10^2 \text{ м/с}$$

$$T = 20 \text{ }^{\circ}\text{C} = (273 + 20) \text{ К} = 293 \text{ К} = 2,93 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

$m_0$  - ?

**Решение:**

Запишем основное уравнение молекулярно-кинетической теории:

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^{-2} = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2$$

и зависимость давления газа от концентрации его молекул и температуры:

$$p = nkT$$

Приравнявая правые части уравнений, получим:

$$nkT = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2$$

$$kT = \frac{1}{3} m_0 v_{\text{ср.кв.}}^2$$

$$m_0 = \frac{3kT}{v_{\text{ср.кв.}}^2}$$

$$m_0 = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3,73 \cdot 10^2}{(5,4 \cdot 10^2)^2} \text{ кг},$$

$$m_0 = 5,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

$$[m_0] = \left[ \frac{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{с}^2}{\text{К} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2} \right] = [\text{кг}]$$

**6.**

На сколько процентов увеличивается средняя квадратичная скорость молекул воды в нашей крови при повышении температуры от 37 до 40 °С?

**Дано:**

$$T_1 = 310 \text{ K}$$

$$T_2 = 313 \text{ K}$$

$\eta - ?$

**Решение:**

$$\eta = \frac{\Delta v_{\text{ср.кв.}}}{v_{\text{ср.кв.}}} \cdot 100\%,$$

$$\Delta v_{\text{ср.кв.}} = v_{2\text{ср.кв.}} - v_{1\text{ср.кв.}}$$

$$\eta = \left( \frac{v_{2\text{ср.кв.}}}{v_{1\text{ср.кв.}}} - 1 \right) \cdot 100\%.$$

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2, \quad p = nkT;$$

$$\frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2 = nkT,$$

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}};$$

$$v_{2\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3kT_2}{m_0}};$$

$$v_{1\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3kT_1}{m_0}}.$$

$$\eta = \left( \frac{\sqrt{\frac{3kT_2}{m_0}}}{\sqrt{\frac{3kT_1}{m_0}}} - 1 \right) \cdot 100\%,$$

$$\eta = \left( \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} - 1 \right) \cdot 100\%,$$

$$\eta = \left( \sqrt{\frac{313}{310}} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad \eta \approx 0,5\%.$$

## Глава III. Уравнение состояния идеального газа. Газовые законы

### Упражнение 3.

1.

Газ сжат изотермически от объема  $V_1 = 8$  л до объема  $V_2 = 6$  л. Давление при этом возросло на  $\Delta p = 4$  кПа. Каким было начальное давление  $p_1$ ?

Дано:

$$\Delta p = 4 \text{ кПа} = 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$V_1 = 8 \text{ л}$$

$$V_2 = 6 \text{ л}$$

$$m = \text{const}$$

$$T = \text{const}$$

---

$$p_1 - ?$$

Решение:

Согласно закону Бойля-Мариотта, для газа данной массы  $m = \text{const}$  при постоянной температуре  $T = \text{const}$  произведение давления газа  $p$  на его объем  $V$  постоянно  $pV = \text{const}$ .

$$p_1 V_1 = p_2 V_2,$$

$$\Delta p = p_2 - p_1, \quad p_2 = p_1 + \Delta p;$$

$$p_1 V_1 = (p_1 + \Delta p) V_2, \quad p_1 V_1 =$$

$$= p_1 V_2 + \Delta p V_2;$$

$$p_1 (V_1 - V_2) = \Delta p V_2,$$

$$p_1 = \frac{\Delta p V_2}{V_1 - V_2},$$

$$p_1 = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 6}{8 - 6} \text{ Па}, \quad p_1 = 1,2 \cdot 10^4 \text{ Па} = 12 \text{ кПа}.$$



2.

Компрессор, обеспечивающий работу отбойных молотков, засасывает из атмосферы  $V = 100$  л воздуха в 1 с. Сколько отбойных молотков может работать от этого компрессора,

если для каждого молотка необходимо  $V_1 = 100 \text{ см}^3$  воздуха в 1 с при давлении  $p = 5 \text{ МПа}$ ? Атмосферное давление  $p_0 = 100 \text{ кПа}$ .

**Дано:**

$$p_0 = 100 \text{ кПа} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V = 100 \text{ л} = 10^{-1} \text{ м}^3$$

$$p = 5 \text{ МПа} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$V_1 = 100 \text{ см}^3 = 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$m = \text{const}$$

$$T = \text{const}$$

---


$$n - ?$$

**Решение:**

За 1 с воздух объема  $V$  поступает в компрессор. Объем воздуха, поступающего за 1 с к отбойным молоткам под давлением  $p$  равен  $nV_1$ , где  $n$  – число отбойных молотков. Предположим, что воздух в компрессоре не нагревается (т.е. его температура не меняется). В этом

случае можно использовать закон Бойля-Мариотта.

$$p_0 V = p n V_1, \quad n = \frac{p_0 V}{p V_1}.$$

$$n = \frac{1 \cdot 10^5 \cdot 10^{-1}}{5 \cdot 10^6 \cdot 10^{-4}}; \quad n = 20.$$

### 3.

Постройте изотермы для 2 г водорода при 0 0С в координатах  $p, V; V, T$  и  $p, T$ .

**Дано:**

$$m = 2 \text{ г} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$T = (273+0)\text{К} =$$

$$= 273 \text{ К} = 2,73 \cdot 10^2 \text{ К}$$

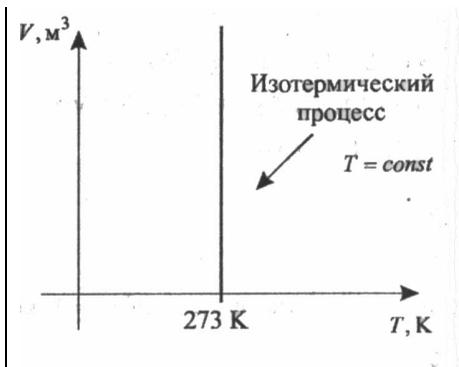
$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

$$m = \text{const}$$

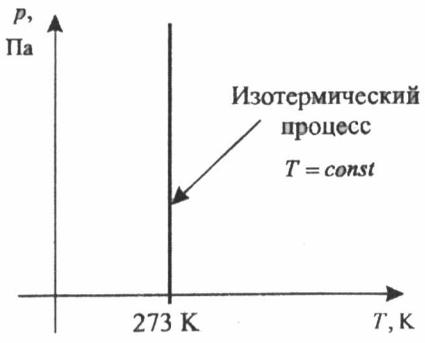
$$T = \text{const}$$

**Решение:**

В координатах  $V, T$  и  $p, T$  изотермы представляют собой вертикальные прямые  $T = 273 \text{ К}$ .



графики  
Изотермы - ?



в координатах  $p, V$  изотерма представляет собой гиперболу  $pV = \text{const}$  (закон Бойля-Мариотта).



Согласно закону Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \quad pV = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 2,73 \cdot 10^2 \text{ Дж.}$$

$$pV = 2,27 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2,27 \text{ кДж.}$$

	$p, \text{ Па}$	$V, \text{ м}^3$
1	324,1	7
2	7	324,1
3	58,2	39
4	39	58,2

#### 4.

Определите температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если давление газа увеличивается на 0,4% первоначального давления при нагревании на 1 К.

**Дано:**

$$\Delta T = 1 \text{ К}$$

$$\frac{\Delta p}{p_1} 100\% = 0,4\%$$

$$V = \text{const}$$

$$m = \text{const}$$

---

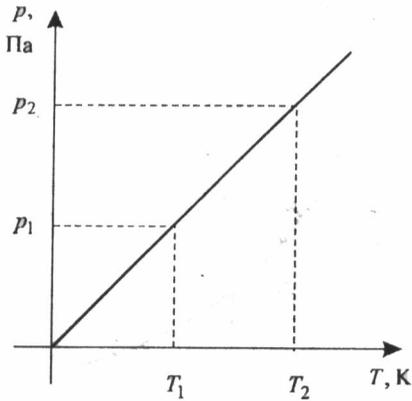

$$T_2 - ?$$

**Решение:**

Поскольку процесс происходит в закрытом сосуде, то  $m = \text{const}$  и  $V = \text{const}$ . Это означает, что процесс является изохорным. Согласно закону Шарля в этом случае

$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}.$$



По условию задачи:  $p_2 = p_1 + \Delta p$ ,  $\frac{\Delta p}{p_1} = \frac{0,4\%}{100\%} = 4 \cdot 10^{-3}$ .

$$\frac{p_1}{T_2 - \Delta T} = \frac{p_2}{T_2}, \quad p_1 T_2 = p_2 T_2 - p_2 \Delta T,$$

$$T_2 = \frac{p_2 \Delta T}{p_2 - p_1},$$

$$T_2 = \frac{\Delta T}{1 - \frac{p_1}{p_1 + \Delta p}} = \frac{\Delta T \left(1 + \frac{\Delta p}{p_1}\right)}{\frac{\Delta p}{p_1}},$$

$$T_2 = \frac{1 \cdot 1,004}{4 \cdot 10^{-3}} K = 250 K.$$

## 5.

*При переходе определенной массы газа из одного состояния в другое его давление уменьшается, а температура увеличивается. Как меняется его объем?*

**Дано:**

$$p_2 < p_1 \\ T_2 > T_1 \\ m = \text{const}$$

---

$$V_1 \propto V_2$$

**Решение:**

Согласно уравнению Клайперона-Менделеева

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = \frac{m}{M} R = \text{const},$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}.$$

Так как  $p_1 > p_2$  и  $T_2 > T_1$ , то  $\frac{p_1}{p_2} > 1$  и  $\frac{T_2}{T_1} > 1$ , следовательно

$$\frac{V_2}{V_1} > 1, V_2 > V_1.$$

Следовательно, при переходе газа из одного состояния в другое при данных условиях объем газа увеличивается.

## 6.

*Чему равен объем одного моля идеального газа при нормальных условиях?*

**Дано:**

$$v = 1 \text{ моль} \\ R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \\ p = 101325 \text{ Па} = \\ = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ T = 273 \text{ К} = 2,73 \cdot 10^2 \text{ К}$$

---

$$V - ?$$

**Решение:**

Запишем закон Менделеева-

Клайперона:  $pV = \nu RT$ ,

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

$$V = \frac{1 \cdot 8,31 \cdot 2,73 \cdot 10^2}{1,01325 \cdot 10^5} \text{ м}^3, V = 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$[V] = \left[ \frac{\text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{моль} \cdot \text{К} \cdot \text{Па}} \right] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Па}} \right] = \left[ \frac{\text{И} \cdot \text{м}}{\frac{\text{И}}{\text{м}^2}} \right] = [\text{м}^3]$$

## 7.

Найдите массу воздуха в классе, где вы занимаетесь, при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении. Молярную массу воздуха принять равной  $0,029\text{ кг/моль}$ .

**Дано:**

$$T = 273\text{ K} = 2,73 \cdot 10^2\text{ K}$$

$$p = 101325\text{ Па} =$$

$$= 1,01325 \cdot 10^5\text{ Па}$$

$$M = 0,029\text{ кг/моль} =$$

$$= 2,9 \cdot 10^{-2}\text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

m - ?

**Решение:**

Воспользуемся законом Менделеева-

Клайперона:  $pV = \nu RT$ ,

Найдем плотность воздуха  $\rho$  в классе:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\rho \cdot M}{R \cdot T},$$

$$\rho = \frac{1,01325 \cdot 10^5 \cdot 2,9 \cdot 10^{-2}}{8,31 \cdot 2,93 \cdot 10^2} = 1,21\text{ кг/м}^3.$$

$$[p] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{К} \cdot \text{Дж}} \right] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3} \right] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right],$$

$$[\text{Дж}] = [H \cdot m], [H] = [\text{Па} \cdot \text{м}^2]$$

Теперь можно определить массу воздуха в классе. Для этого необходимо вычислить объем воздуха в классе. Пусть площадь класса  $100\text{ м}^2$ , высота потолков  $4\text{ м}^2$ . Тогда  $V = 400\text{ м}^3 = 4 \cdot 10^2\text{ м}^3$  и

$$m = \rho V = 4 \cdot 10^2\text{ м}^3 \cdot 1,21 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 484\text{ кг}.$$

## 8.

Плотность некоторого газообразного вещества равна  $2,5\text{ кг/м}^3$  при температуре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении. Найдите молярную массу этого вещества.

**Дано:**

$$\begin{aligned} p &= 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ T &= (273+10)\text{К} = \\ &= 283 \text{ К} = 2,83 \cdot 10^2 \text{ К} \\ \rho &= 2,5 \text{ кг/м}^3 \\ R &= 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \end{aligned}$$

$M - ?$

**Решение:**

Для газообразного вещества справедлив закон Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \nu RT,$$

$$M = \frac{m}{\nu} RT,$$

$$\frac{m}{V} = \rho - \text{плотность вещества}:$$

$$M = \frac{\rho RT}{p},$$

$$M = \frac{2,5 \cdot 8,31 \cdot 2,83 \cdot 10^2}{1,01325 \cdot 10^5} \text{ кг/моль} = 5,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль} = 0,058 \text{ кг/моль}.$$

$$[M] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{м}^3 \cdot \text{К} \cdot \text{моль} \cdot \text{Па}} \right] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{м}^3 \cdot \text{моль} \cdot \text{Па}} \right] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \right].$$

**9.**

В баллоне вместимостью  $0,03 \text{ м}^3$  находится газ под давлением  $1,35 \cdot 10^6 \text{ Па}$  при температуре  $455 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какой объем занимал бы этот газ при нормальных условиях ( $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ )?

**Дано:**

$$\begin{aligned} V_1 &= 0,03 \text{ м}^3 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \\ p_1 &= 1,35 \cdot 10^6 \text{ Па} \\ T_1 &= (273+455)\text{К} = \\ &= 7,28 \cdot 10^2 \text{ К} \\ p_2 &= 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ T_2 &= (273+0)\text{К} = \\ &= 2,73 \cdot 10^2 \text{ К} \\ m &= \text{const} \end{aligned}$$

$V_2 - ?$

$$V_2 \approx 0,15 \text{ м}^3.$$

**Решение:**

Запишем для данного газа уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} R = \text{const},$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad V_2 = \frac{p_1 T_2}{p_2 T_1} \cdot V_1,$$

$$V_2 = \frac{1,35 \cdot 10^6 \cdot 2,73 \cdot 10^2}{1,01325 \cdot 10^5 \cdot 7,28 \cdot 10^2} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

## 10.

Высота пика Ленина на Памире равна 7134 м. Атмосферное давление на этой высоте равно  $3,8 \cdot 10^4$  Па. Определите плотность воздуха на вершине пика при температуре  $0^\circ\text{C}$ , если плотность воздуха при нормальных условиях  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

**Дано:**

$$h = 7134 \text{ м} = 7,134 \cdot 10^3 \text{ м}$$

$$p_1 = 3,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$T = T_1 = T_2 = 2,73 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$\rho_2 = 1,29 \cdot \text{кг/м}^3$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

$$p_2 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\rho_1 - ?$$

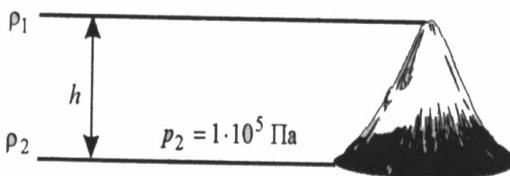
**Решение:**

Воспользуемся уравнением состояния идеального газа:

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

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}.$$

$$p_1 = 3,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$$



$$\rho_1 = \frac{p_1 M}{RT_1}, \rho_2 = \frac{p_2 M}{RT_2};$$

$$M = \frac{\rho_1 RT_2}{p_2};$$

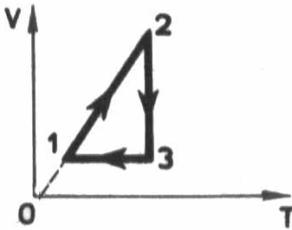
$$\rho_1 = \frac{p_1 T_1}{p_2 T_2} \cdot \rho_2.$$

По условию  $T_1 = T_2$ , т.е.  $\rho_1 = \frac{p_1}{p_2} \cdot \rho_2$ ;

$$\rho_1 = \frac{3,8 \cdot 10^4}{10^5} \cdot 1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \rho_1 \approx 0,49 \text{кг} / \text{м}^3.$$

## 11.

На рисунке дан график изменения состояния идеального газа в координатах  $V, T$ . Представьте этот процесс на графиках в координатах  $p, V$  и  $p, T$ .



### Решение:

Любой процесс изменения состояния идеального газа протекает в соответствии с уравнением Менделеева-Клайперона:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M} R = const \quad (1).$$

Процесс 1-2 изображен на графике как отрезок прямой, проходящей через начало координат:

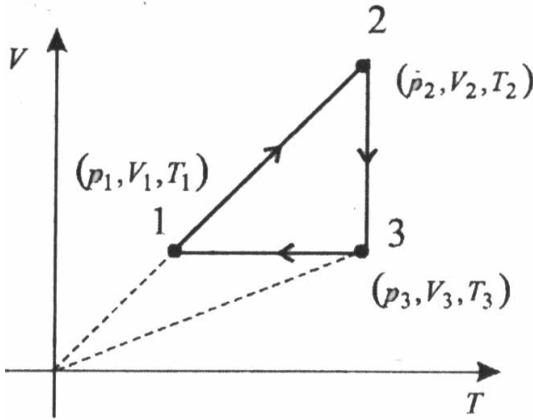
$V = \gamma T$ , где  $\gamma$  - некоторый коэффициент пропорциональности (постоянная величина). В координатах  $p, V$  уравнение данного процесса выглядит, согласно (1), следующим образом:

$$p = \frac{m}{M} R \frac{T}{V} = \frac{mR}{M\gamma} = const.$$

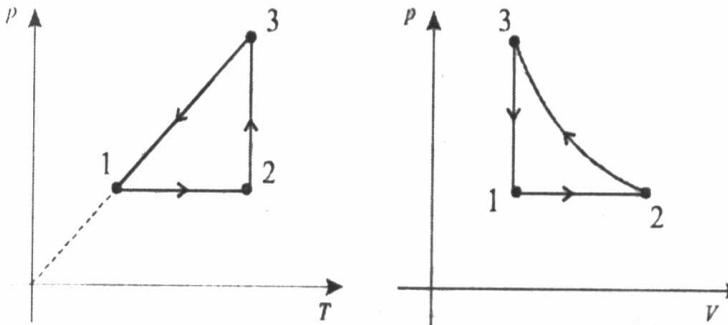
Из этого уравнения видно, что процесс 1-2 – изобарный,  $p_2 = p_1$ .

В координатах  $p, V$  и  $p, T$  он изображается горизонтальным отрезком.

Из графика в координатах  $V, T$  видно:  $T_2 > T_1$ ,  $V_2 > V_1$ , что определяет направление процесса.



Процесс 2-3, как видно из рисунка, изотермический,  $T_3 = T_2$ . В координатах  $p, T$  он изображается вертикальным отрезком, в координатах  $p, V$  – гиперболой. Из рисунка видно, что  $V_3 < V_2$ , и, согласно уравнению Менделеева-Клайперона (1),  $p_3 > p_2$ , что определяет направления процесса в координатах  $p, V$  и  $p, T$ . Процесс 3-1 – изохорный, так как  $V_3 = V_1$ . В координатах  $p, V$  изображается вертикальным отрезком, а в  $p, T$  (согласно (1)) отрезком на прямой, проходящей через начало координат. Из рисунка видно, что  $T_3 > T_1$  и, соответственно,  $p_3 > p_1$ .



## 12.

Выразите среднюю квадратичную скорость молекулы через универсальную газовую постоянную и молярную массу.

**Дано:**

R, T, M

**Решение:**

Воспользуемся основным уравнением молекулярно-кинетической теории и уравнением Менделеева-Клапейрона:

$v_{\text{ср.кв.}} - ?$

$$\begin{cases} p = \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2 \\ pV = \frac{m}{M} RT \end{cases}$$

Подставим p из первого уравнения во второе:

$$V \frac{1}{3} m_0 n v_{\text{ср.кв.}}^2 = \frac{m}{M} RT,$$

$$n = \frac{N}{V};$$

$$\frac{1}{3} m_0 N v_{\text{ср.кв.}}^2 = \frac{m}{M} RT,$$

$$m = m_0 N;$$

$$\frac{1}{3} v_{\text{ср.кв.}}^2 = \frac{RT}{M}.$$

$$v_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Помимо универсальной газовой постоянной R и молярной массы M в ответ входит температура, так как температура – это мера средней кинетической энергии молекул.

### 13.

В баллоне находится газ при температуре  $15^{\circ}\text{C}$ . Во сколько раз уменьшится давление газа, если 40 % его выйдет из баллона, а температура при этом понизится на  $8^{\circ}\text{C}$ ?

**Дано:**

$$T_1 = 15^{\circ}\text{C} = 2,88 \cdot 10^2 \text{ K}$$

$$\Delta m = 0,4 m_1$$

$$\Delta T = 8 \text{ K}$$

**Решение:**

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1,$$

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2;$$

$$\Delta m = m_1 - m_2,$$

$$m_2 = m_1 - \Delta m;$$

$$\Delta T = T_1 - T_2,$$

$$T_2 = T_1 - \Delta T;$$

---

$$\frac{p_1}{p_2} - ?$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{T_1}{T_2};$$

$$p_2 V = \frac{m_1 - \Delta m}{M} R (T_1 - \Delta T),$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_1 - \Delta m} \cdot \frac{T_1}{T_1 - \Delta T} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta m}{m_1}} \cdot \frac{T_1}{T_1 - \Delta T} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot \frac{2,88 \cdot 10^2}{2,88 \cdot 10^2 - 8},$$

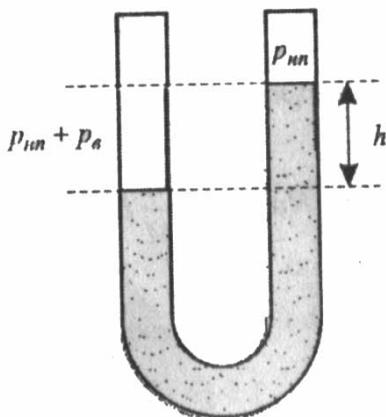
$$\frac{p_1}{p_2} \approx 1,7.$$

## Глава IV. Взаимные превращения жидкостей и газов

### Упражнение 4.

1.

*В обоих коленах запаянной U-образной трубки вода стоит на разных уровнях. Можно ли сказать, что, кроме насыщенного водяного пара, над водой имеется воздух?*



**Ответ:**

Чтобы существовало равновесие в обоих коленах надо чтобы существовало и равенство давлений газов над поверхностями жидкости. Разница уровней в коленах U-образной трубки должна уравниваться давлением воздуха. Значит в том колене, где уровень воды ниже, кроме насыщенного пара, имеется воздух.

2.

*Как будет меняться температура кипения воды, если сосуд с водой опускать в глубокую шахту?*

**Ответ:**

При опускании сосуда с водой в шахту внешнее давление увеличивается. А чем выше давление на жидкость, тем и выше температура кипения соответственно.

3.

*Чему равна плотность пара в пузырьках, поднимающихся к поверхности воды, кипящей при атмосферном давлении?*

**Дано:**

$$p_{\text{атм.}} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

$$M = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

$$T = 373 \text{ К} = 3,73 \cdot 10^2 \text{ К}$$

**Решение:**

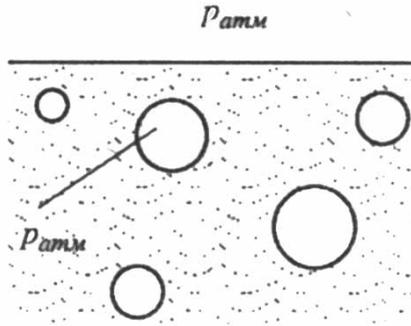
При кипении давление насыщенного пара внутри пузырька равно давлению в жидкости. Запишем закон Менделеева-Клапейрона для насыщенного пара:

$$pV = \frac{RT}{M},$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT},$$

$$p = p_{\text{атм.}}$$

$\rho$  - ?



$$\rho = \frac{1,01325 \cdot 10^5 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}{8,31 \cdot 3,73 \cdot 10^2} \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho \approx 0,59 \text{ кг/м}^3.$$

$$[\rho] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}} \right] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{кг}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3} \right] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right],$$

$$[\text{Дж}] = [\text{Па} \cdot \text{м}^3]$$

Замечание: при решении задачи предполагается, что давление в жидкости  $p$  равно атмосферному  $p_{атм}$ . Это справедливо в том случае, если кипение происходит в не очень глубоком сосуде.

Если глубина достаточно большая, то необходимо использовать формулу, учитывающую гидростатическое давление в жидкости:

$$p = p_{атм} + \rho gh, \text{ где } \rho = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} - \text{плотность воды, } g \approx \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Глубина, на которой  $p_{атм} \approx \rho gh$  равна:

$$h_{кр} \approx \frac{p_{атм}}{\rho g} \approx \frac{10^5}{1000 \cdot 10} \approx 10 \text{ м.}$$

#### 4.

*На улице моросит холодный осенний дождь. В комнате развешано выстиранное белье. Высохнет ли белье быстрее, если открыть форточку?*

#### **Ответ:**

В данном случае открытие форточки приведет к изменению температуры, влажности, появлению конвекции. Пониженная температура замедляет высыхание, но конвекция ускоряет. Допустим, что в комнате до открывания форточки и на улице одинаковые относительные влажности  $\phi$ , тогда парциальное давление водяного пара  $\phi \cdot p_{\text{нк}}$  будет в комнате больше, чем парциальное давление водяного пара  $\phi \cdot p_{\text{ну}}$  на улице, т.е.  $P_{\text{нк}} > P_{\text{ну}}$ . В итоге пар из комнаты будет выходить и влажность уменьшится, ускоряя процесс высыхания белья. Если пренебречь изменением температуры, появлением конвекции, а также предположить абсолютную влажность в комнате большую, чем на улице, то с открытием форточки скорость высыхания белья увеличится.

#### 5.

*Всасывающий насос поднимает холодную воду на высоту 10,3 м. На какую высоту он поднимет воду, кипящую при температуре 100 °С, если поршень насоса перемещается очень медленно?*

**Дано:**

$$h = 10,3 \text{ м}$$

$$p_{\text{атм.}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_2 = 373 \text{ К}$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

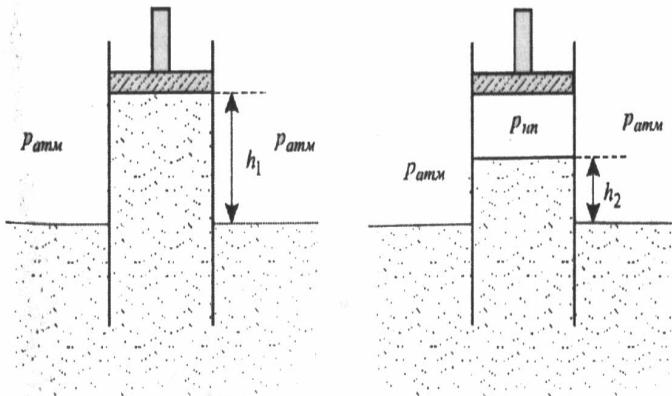
**Решение:**

Всасывающий насос поднимает воду до тех пор, пока гидростатическое давление водяного столба не уравнивает разность атмосферного давления и давления под поршнем.

Так как поршень насоса перемещается очень медленно, то с поверхности водяного столба успевает испариться достаточное количество воды для того, чтобы под поршнем имелся насыщенный водяной пар. Запишем равенство атмосферного давления

$p_{\text{атм}}$  и давления в нижней точке

$h_2 - ?$



водяного столба  $p$ , которое складывается из давления насыщенного пара  $p_{\text{нп}}$  и гидростатического давления:  $\rho gh$ :

$$\begin{cases} p_{\text{атм}} = p_{\text{нп}} + \rho gh_1 \\ p_{\text{атм}} = p_{\text{нп}} + \rho gh_2 \end{cases}$$

где  $p_{\text{нпк}}$  – давление насыщенного пара холодной воды,  $p_{\text{нпк}}$  – давление насыщенного пара кипящей воды. Если вода кипит при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то атмосферное давление равно нормальному атмосферному давлению  $p_{\text{атм}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Из первого уравнения получим:

$$p_{\text{нпк}} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} - 10^3 \cdot 9,8 \cdot 10,3 \text{ Па} \approx (1,01 - 10,1) 10^5 \text{ Па} -$$

пренебрежимо мало.

Из второго уравнения получим (учитывая, что  $p_{\text{нпк}} = p_{\text{атм}}$ ):

$$\rho g h_2 = 0, \quad h_2 = 0. \text{ Всасывающий насос не может поднимать}$$

кипящую воду, поскольку при кипении давление насыщенного пара равно атмосферному.

## 6.

*В комнате объемом  $V = 120 \text{ м}^3$  при температуре  $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха  $\varphi = 60\%$ . Определите массу водяных паров в воздухе комнаты. Давление насыщенных паров  $p_0$  при  $t = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно  $12,8 \text{ мм рт.ст.}$*

### Дано:

$$V = 120 \text{ м}^3 = 1,2 \cdot 10^2 \text{ м}^3$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

$$T = 288 \text{ К} = 2,88 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$\varphi = 60\%$$

$$p_{\text{вп}} = 12,8 \text{ мм.рт.ст.} =$$

$$= 1,71 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$M = 0,018 \text{ кг/м}^3 =$$

### Решение:

По определению относительной

влажности  $\varphi = \frac{p_n}{p_{\text{вп}}} \cdot 100\%$ , где  $p_n$  –

давление пара,  $p_{\text{вп}}$  – давление насыщенного пара;

$$p_n = \frac{\varphi \cdot p_{\text{вп}}}{100\%}.$$

$$= 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$$

Запишем уравнение Менделеева-Клайперона:

$$m_n - ?$$

$$p_n V = \frac{m_n}{M} RT, \quad m_n = \frac{p_n V \cdot M}{RT};$$

$$m_n = \frac{\varphi \cdot p_{vn} \cdot V \cdot M}{100\% \cdot R \cdot T},$$

$$m_n = \frac{60 \cdot 1,71 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 10^2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-2}}{10^2 \cdot 8,31 \cdot 2,88 \cdot 10^2} \text{ кг}, \quad m_n \approx 0,92 \text{ кг}.$$

$$[m] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}} \right] = \left[ \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг}}{\text{Па} \cdot \text{м}^3} \right] = [\text{кг}]$$

$$[\text{Дж}] = [\text{Па} \cdot \text{м}^3]$$

7.

При температуре  $t=20^\circ\text{C}$  относительная влажность в комнате  $\varphi_1 = 20\%$ . Какую массу воды нужно испарить для увеличения влажности до  $\varphi_2 = 50\%$ , если объем комнаты  $V = 40 \text{ м}^3$ ? Плотность насыщенных паров воды при температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  равна  $\rho_0 = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$ .

**Дано:**

$$T = 293 \text{ К} = 2,93 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$\varphi_1 = 20\%$$

$$\varphi_2 = 50\%$$

$$V = 40 \text{ м}^3$$

$$p_{vn} = 1,73 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$$

$$T = \text{const}$$

**Решение:**

$$\varphi_1 = \frac{p_{n1}}{p_{vn1}} \cdot 100\%, \quad \varphi_2 = \frac{p_{n2}}{p_{vn2}} \cdot 100\%,$$

$$(p_{vn1} = p_{vn2} = p_{vn}, \text{ т.к. } T = \text{const}).$$

Согласно уравнению Менделеева-Клайперона:

$$p_{vn} = \frac{\rho_{vn} \cdot RT}{M},$$

$$p_n = \frac{\rho_n \cdot RT}{M},$$

$\Delta m$  - ?

$$\frac{p_n}{p_{vn}} = \frac{\rho_n}{\rho_{vn}}.$$

Следовательно, относительную влажность можно вычислить по формуле:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{vn}} \cdot 100\%,$$

где  $\rho_n$  - плотность пара,

$\rho_{vn}$  - плотность насыщенного пара.

$$\varphi_1 = \frac{\rho_{n1}}{\rho_{vn}} \cdot 100\% (1);$$

$$\varphi_2 = \frac{\rho_{n2}}{\rho_{vn}} \cdot 100\% (2);$$

Вычтем из (2) выражение (1) и найдем изменение плотности паров воды в комнате.

$$\frac{(\varphi_2 - \varphi_1) \cdot \rho_{nn}}{100\%} = \Delta \rho_n;$$

$$\Delta \rho_n = \frac{\Delta m}{V},$$

$$\Delta m = \frac{(\varphi_2 - \varphi_1) \rho_{nn} \cdot V}{100\%};$$

$$\Delta m = \frac{(50 - 20) \cdot 1,73 \cdot 10^{-2} \cdot 40}{100} \text{ кг}, \Delta m \approx 0,21 \text{ кг}.$$

## Глава V. Твердые тела

### Упражнение 5.

1.

*Плуг сцеплен с трактором стальным тросом. Допустимое напряжение материала троса  $\sigma = 20$  ГПа. Какой должна быть площадь поперечного сечения троса, если сопротивление почвы движению плуга равно  $1,6 \cdot 10^5$  Н?*

**Дано:**

$$F = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Н}$$
$$\sigma = 20 \text{ ГПа} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Па}$$

S - ?

**Решение:**

По определению напряжения  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad S = \frac{F}{\sigma};$$

$$S = \frac{1,6 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^{10}} \text{ м}^2,$$

$$S = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 8 \text{ мм}^2.$$

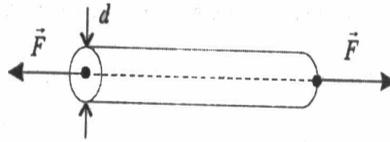
2.

*Каким должен быть модуль силы, приложенной к стержню вдоль его оси, чтобы в стержне возникло напряжение  $1,5 \cdot 10^8$  Па? Диаметр стержня равен 0,4 см.*

**Дано:**

$$d = 0,4 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$
$$\sigma = 1,5 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

**Решение:**



F - ?

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

$$S = \frac{\pi d^2}{4};$$

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2},$$

$$F = \frac{\pi d^2 \sigma}{4};$$

$$F = \frac{3,14 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot 1,5 \cdot 10^8}{4} \text{ Н},$$

$$F \approx 1,9 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

### 3.

Какое напряжение возникает у основания кирпичной стены высотой 20м? Плотность кирпича равна  $1800 \text{ кг/м}^3$ . Одинаковой ли должна быть прочность кирпичей у основания стены и в верхней ее части?

**Дано:**

$$\rho = 1800 \text{ кг/м}^3 =$$

$$= 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

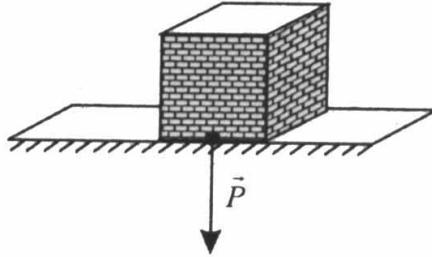
$$h = 20 \text{ м}$$

$\sigma$  - ?

**Решение:**

$$\sigma = \frac{P}{S},$$

где S – площадь поперечного сечения стены,  
P – вес кирпичей стены, равный силе тяжести F.



$$P = F = mg,$$

$$m = \rho V,$$

$$V = Sh,$$

$$m = \rho Sh,$$

$$F = \rho g \cdot S \cdot h,$$

$$\sigma = \frac{\rho g \cdot S \cdot h}{S},$$

$$\sigma = \rho gh;$$

$$\sigma = 1,8 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 20 \text{ Па},$$

$$\sigma \approx 3,53 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Прочность кирпича в верхней части стены может быть меньше, чем в нижней, поскольку напряжение на высоте  $h_1$  равно  $\rho g(h-h_1) < \rho gh_1$ .

#### 4.

*Какую наименьшую длину должна иметь свободно подвешенная за один конец стальная проволока, чтобы она разорвалась под действием силы тяжести? Предел прочности стали равен  $3,2 \cdot 10^8$  Па, плотность –  $7800 \text{ кг/м}^3$ .*

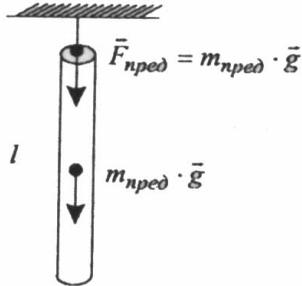
Дано:

$$\sigma_{\text{пред}} = 3,2 \cdot 10^8 \text{ Па}$$

$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

Решение:



$$l_{\text{пред}} - ?$$

Запишем выражение для предельного напряжения стальной проволоки с площадью поперечного сечения  $S$ :

$$\sigma_{\text{пред}} = \frac{F_{\text{пред}}}{S},$$

где  $F_{\text{пред}}$  – предельная сила натяжения проволоки.

Сила натяжения проволоки у верхнего конца определяется ее весом:

$$F_{\text{пред}} = m_{\text{пред}} \cdot g,$$

$$m_{\text{пред}} = \rho \cdot S \cdot l_{\text{пред}},$$

$$\sigma_{\text{пред}} = \rho \cdot l_{\text{пред}} \cdot g,$$

$$l_{\text{пред}} = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\rho \cdot g},$$

$$l_{\text{пред}} = \frac{3,2 \cdot 10^8}{7,8 \cdot 10^3 \cdot 9,8} \text{ м},$$

$$l_{\text{пред}} \approx 4,2 \cdot 10^3 \text{ м} = 4200 \text{ м}.$$

## 5.

Под действием силы 100 Н проволока длиной 5 м и площадью поперечного сечений 2,5 мм<sup>2</sup> удлинилась на 1 мм. Определите напряжение, испытываемое проволокой и модуль Юнга.

**Дано:**

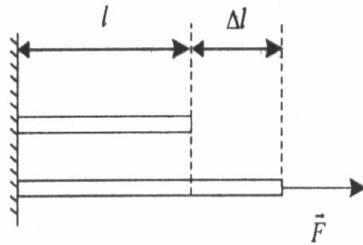
$$F = 100 \text{ Н} = 10^2 \text{ Н}$$

$$l = 5 \text{ м}$$

$$S = 2,5 \text{ мм}^2 = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$$\Delta l = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$$

**Решение:**



$\sigma = ?$   $E = ?$

$$\sigma = \frac{F}{S};$$

$$\sigma = \frac{10^2 \text{ Н}}{2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2},$$

$$\sigma = 4 \cdot 10^7 \text{ Па}.$$

Согласно закону Гука:  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , где  $E$  – модуль Юнга,

$\varepsilon$  – относительное удлинение

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l},$$

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l};$$

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l},$$

$$E = \frac{F \cdot l}{S \cdot \Delta l};$$

По определению напряжения

$$E = \frac{10^2 \cdot 5}{2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3}} \text{ Па},$$

$$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}.$$

**6.**

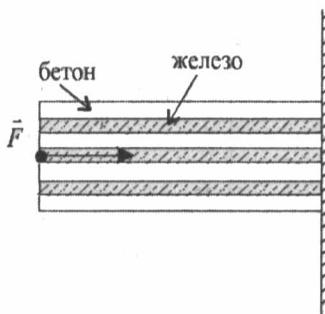
Железобетонная колонна сжимается силой  $F$ . Полагая, что модуль Юнга бетона  $E_{\text{б}}$  составляет  $1/10$  модуля Юнга железа  $E_{\text{ж}}$ , а площадь поперечного сечения железа составляет  $1/20$  площади поперечного сечения бетона, найдите, какая часть нагрузки приходится на бетон.

**Дано:**

$$E_{\text{б}} = \frac{1}{10} E_{\text{ж}}$$

$$S_{\text{ж}} = \frac{1}{20} S_{\text{б}}$$

**Решение:**



$$\frac{F_{\text{б}}}{F} - ?$$

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

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{F_{\text{б}}}{S_{\text{б}}};$$

$$\sigma = E |\varepsilon|,$$

$$\sigma_{\text{б}} = E_{\text{б}} |\varepsilon_{\text{б}}|.$$

Относительное удлинение у бетона и железобетонной конструкции равны, т.е.  $|\varepsilon| = |\varepsilon_{\delta}|$ .

$$F = E \cdot S \cdot |\varepsilon|, \quad F_{\delta} = E_{\delta} S_{\delta} \cdot |\varepsilon|,$$

$$F_{жс} = E_{жс} \cdot S_{жс} \cdot |\varepsilon|.$$

Силу, действующую на железобетонную конструкцию в целом, можно разделить на силы, действующие на бетон и железо:  $F = F_{\delta} + F_{жс}$ . По условию:

$$E_{жс} = 10E_{\delta},$$

$$S_{жс} = \frac{1}{20} S_{\delta};$$

$$F_{жс} = \frac{1}{2} E_{\delta} \cdot S_{\delta} |\varepsilon|,$$

$$F_{\delta} = E_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot |\varepsilon|,$$

$$F_{жс} = \frac{1}{2} F_{\delta};$$

$$F = F_{жс} + F_{\delta} = \frac{1}{2} F_{\delta} + F_{\delta} = \frac{3}{2} F_{\delta},$$

$$\frac{F_{\delta}}{F} = \frac{2}{3}.$$

# Глава VI. Основы термодинамики

## Упражнение 6.

1.

*Как изменится внутренняя энергия одноатомного идеального газа, если его давление увеличится в 3 раза, а объем уменьшится в 2 раза?*

**Дано:**

$$p_2 = 3p_1$$

$$V_2 = \frac{1}{2} V_1$$

---

$$\frac{U_2}{U_1} = ?$$

**Решение:**

Внутренняя энергия  $U$  одноатомного идеального газа определяется формулой 6.1 § 23 учебника:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

Выразим изменение температуры газа через изменение объема и давления с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона:

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

$$U = \frac{3}{2} pV;$$

$$U_1 = \frac{3}{2} p_1 V_1,$$

$$U_2 = \frac{3}{2} p_2 V_2;$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{p_2 V_2}{p_1 V_1};$$

$$p_2 = 3p_1,$$

$$V_2 = \frac{1}{2}V_1,$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\frac{3}{2}p_1V_1}{p_1V_1},$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{3}{2}, \quad \frac{U_2}{U_1} = 1,5.$$

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа увеличится в 1,5 раза.

## 2.

Газ, находящийся под давлением  $p=10^5$  Па, изобарно расширился, совершив работу  $A = 25$  Дж. Насколько увеличился объем газа?

**Дано:**

$$p = 10^5 \text{ Па}$$

$$A = 25 \text{ Дж}$$

$$P = \text{const}$$

$$\Delta V - ?$$

**Решение:**

Работа, совершенная газом при изобарном

процессе, записывается согласно выражению 6.4

§ 23м учебника в виде:

$$A = p\Delta V,$$

$$\Delta V = \frac{A}{p},$$

$$\Delta V = \frac{25 \text{ Дж}}{10^5 \text{ Па}},$$

$$\Delta V = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 = 250 \text{ см}^3.$$

$$[\text{Дж}] = [\text{Па} \cdot \text{м}^3].$$

### 3.

Термодинамической системе передано количество теплоты 200 Дж. Как изменилась внутренняя энергия системы, если при этом она совершила работу 400 Дж?

Дано:

$$Q = 200 \text{ Дж}$$
$$A = 400 \text{ Дж}$$

---

$\Delta U$  - ?

Решение:

Согласно первому закону термодинамики:

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

Количество теплоты, полученное термодинамической системой, идет на изменение внутренней энергии и совершение системой работы.

Замечание: если вместо работы  $A$ , которую совершает система использовать работу  $A$  внешних сил ( $A = -A$ ), то I закон термодинамики можно записать в виде  $\Delta U = A' + Q$ .

$$\Delta U = Q - A; \quad \Delta U = 200 - 400 = -200 \text{ Дж}.$$

Внутренняя энергия уменьшилась на 200 Дж.

### 4.

Стержень отбойного молотка приводится в движение сжатым воздухом. Масса воздуха в цилиндре за время хода поршня меняется от 0,1 до 0,5 г. Считая давление воздуха в цилиндре и температуру (27 °C) постоянными, определите работу газа за один ход поршня. Молярная масса воздуха  $M=0,029$  кг/моль.

**Дано:**

$$m_2 = 0,5 \text{ г} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$m_1 = 0,1 \text{ г} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

$$T = 300 \text{ К} = 3 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$p = \text{const}, T = \text{const}$$

$$M = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

---

A - ?

**Решение:**

Газ совершает работу по перемещению поршня, действуя на него с силой  $pS$ , где  $S$  – площадь поршня. Тогда работа газа может быть записана в виде:

$A = pS\Delta h = p\Delta V$ , где  $\Delta h$  - расстояние, на которое сдвинулся поршень за один ход,  $\Delta V$  - изменение объема газа.

$$A = p\Delta V = p(V_2 - V_1).$$

Для вычисления  $\Delta V$  воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона:

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

$$V_2 = \frac{m_2}{M} \frac{RT}{p},$$

$$V_1 = \frac{m_1}{M} \frac{RT}{p};$$

$$A = \frac{(m_2 - m_1)}{M} RT,$$

$$A = \frac{(5 - 1) \cdot 10^{-4} \cdot 8,31 \cdot 3 \cdot 10^2}{2,9 \cdot 10^{-2}} \text{ Дж}, \quad A \approx 34,4 \text{ Дж}.$$

$$[A] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} \right] = [\text{Дж}]$$

## 5.

На одинаковые газовые горелки поставили два одинаковых плотно закупоренных сосуда вместимостью по 1 л. В одном сосуде находится вода, а в другом – воздух. Какой сосуд быстрее нагревается до  $50^{\circ}\text{C}$ ? Почему?

**Дано:**

$$V_1 = V_2 = V = 1 \text{ л} = \\ = 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$T_1 = T_2 = T = 323 \text{ К} = \\ = 3,23 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3 = \\ = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$M_2 = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

$$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$p_{\text{атм}} = 105 \text{ Па}$$

**Решение:**

Так как газовые горелки и сосуды одинаковые, то в единицу времени воде и воздуху передается одинаковое количество теплоты  $Q$ . Так как объем  $V$  сосудов не меняется, ни вода ни воздух работы не совершают. Следовательно, теплота, переданная горелками, расходуется на изменение внутренней энергии воды и воздуха.

---

$$t_1 \vee t_2$$

$$Q = \Delta U_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot \Delta T_1,$$

где  $c_1$  – удельная теплоемкость воды,  $m_1$  – масса воды.

$$Q = \Delta U_2 = \frac{3}{2} \frac{m_2}{M_2} R \Delta T_2,$$

$m_2$  – масса воздуха.

Вычислим массу воздуха  $m_2$  исходя из уравнения Менделеева-Клапейрона, считая начальную температуру воздуха равной  $T_0$ , давление  $p_0 = p_{\text{атм}}$ .

$$p_{\text{атм}} \cdot V = \frac{m_2}{M_2} R T_0,$$

$$m_2 = \frac{M_2 \cdot p_{\text{атм}} \cdot V}{R \cdot T_0}.$$

Массу воды вычислим по формуле:  $m_1 = \rho_1 \cdot V$ .

Вычислим изменения температур воды и воздуха в единицу времени.

$$Q = c_1 \rho_1 V \Delta T_1,$$

$$Q = \frac{3}{2} \frac{p_{\text{атм}} V}{T_0} \Delta T_2;$$

$$\Delta T_1 = \frac{Q}{c_1 \rho_1 V},$$

$$\Delta T_2 = \frac{2QT_0}{3p_{\text{атм}}V}.$$

Сравним  $\Delta T_1$  и  $\Delta T_2$ , предположив, что  $T_0 = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K} = 2,93 \cdot 10^2 \text{ K}$ :

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{3p_{\text{атм}}}{2T_0 \cdot c_1 \cdot \rho_1} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Па}}{2 \cdot 2,93 \cdot 10^2 \text{ K} \cdot 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} \approx 10^{-4}$$

То есть за единицу времени температура воздуха увеличится гораздо больше, чем температура воды. Это связано с тем, что

теплоемкость 1 л воды  $c_1 \rho_1 V \approx 4,2 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

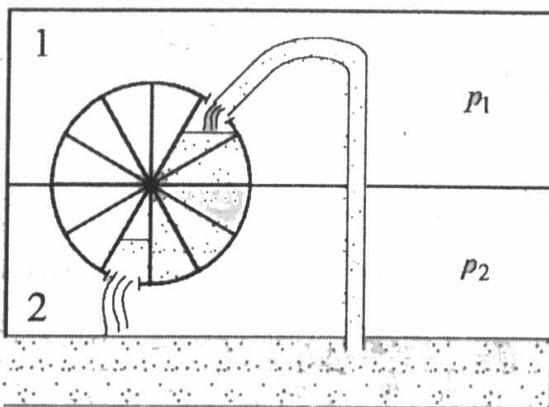
гораздо больше теплоемкости 1 л воздуха

$$\frac{3}{2} \frac{p_{\text{атм}} V}{T_0} \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{10^5 \cdot 10^{-3}}{2,93 \cdot 10^2} \approx 0,5 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

**Замечание:** утверждение справедливо в том случае, если начальное давление воздуха  $p_2 = p_{\text{атм}}$ . Если, например, воздух в сосуде сжат до давления  $10^4 p_{\text{атм}}$  и больше (а в этом случае воздух уже станет жидким), то воздух может нагреваться дальше.

## 6.

Предложен следующий проект вечного двигателя (рисунок).  
Закрытый сосуд разделен на две половинки герметичной перегородкой, сквозь которую пропущены трубка и водяная турбина в кожухе с двумя отверстиями. Давление воздуха в нижней части больше, чем в верхней. Вода поднимается по трубке и наполняет открытую камеру. В нижней части очередная порция воды выливается из камеры турбины, подошедшей к отверстию кожуха. Почему данная машина не будет работать вечно?

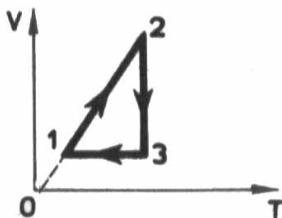


**Ответ:**

Согласно закону сохранения энергии совершение системой работы невозможно без изменения ее внутренней энергии, ее поступление извне, значит предложенный вариант вечного двигателя не будет работать. Расход внутренней энергии будет означать стремление системы к равновесию и следовательно остановки двигателя. Если судить по рисунку, то обмен водой между отсеками двигателя сопровождается поступлением воздуха из нижнего отсека в верхний, что несомненно приведет к увеличению давления  $p_1$ , в верхнем отсеке и уменьшением в нижнем  $p_2$ . С течением времени разность давлений  $\Delta p = p_2 - p_1$  приравняется к нулю и двигатель встанет.

**7.**

*Положительна или отрицательна работа газа в процессах 1-2, 2-3 и 3-1 на рисунке. Получает газ или отдает теплоту в каждом из этих процессов?*



### Решение:

Вернемся к задаче 11 упражнения 3, в которой рисунок перерисован в координатах  $p, V$  и  $p, T$ .

Процесс 1-2 – изобарный, объем газа увеличился  $V_2 > V_1$ . При этом газ совершил положительную работу  $A = p_1 \Delta V = p_1(V_2 - V_1)$ .

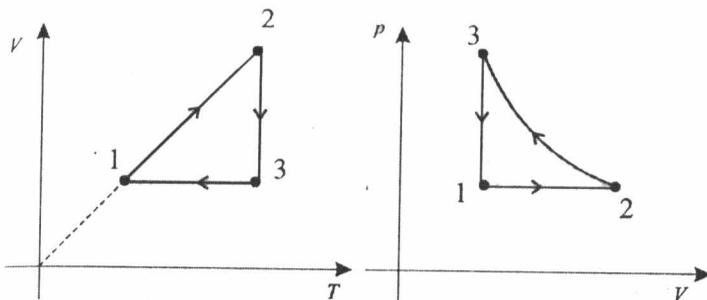
Кроме того, увеличилась температура газа  $T_2 > T_1$ , т.е. увеличилась его внутренняя энергия

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R (T_2 - T_1).$$

Согласно уравнению Менделеева-Клайперона  $pV = \frac{m}{M} RT$  и

$$\Delta U = \frac{3}{2} p_1 (V_2 - V_1).$$
 Соответственно, в этом процессе газ получил

положительную теплоту  $Q_{12} = \Delta U + A = \frac{5}{2} p_1 (V_2 - V_1)$ .



Процесс 2-3 – изотермический. Это значит, что внутренняя энергия газа не изменилась  $\Delta U = 0$ . При этом объем газа уменьшился, т.е. газ совершил отрицательную работу  $A < 0$ . При этом газ отдает теплоту  $Q_{12} = A < 0$ .

Процесс 3-1 – изохорный, что означает, что газ работы не совершил вообще  $A=0$ . При этом температура газа уменьшилась  $T_3 > T_1$ , что означает уменьшение внутренней энергии газа.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_1 - T_3) < 0.$$

Соответственно, при этом газ отдает теплоту:

$$Q_{31} = -\frac{3}{2} \frac{m}{M} R(T_3 - T_1) < 0.$$

## 8.

*Температура газа массой  $m$  и молярной массой  $M$  повышается на  $\Delta T$  один раз при постоянном давлении  $p$ , а другой раз при постоянном объеме  $V$ . Насколько отличаются количества теплоты, сообщенные газу в первом и во втором случаях?*

**Дано:**

$m, M, \Delta T$

1)  $p = \text{const}$

2)  $V = \text{const}$

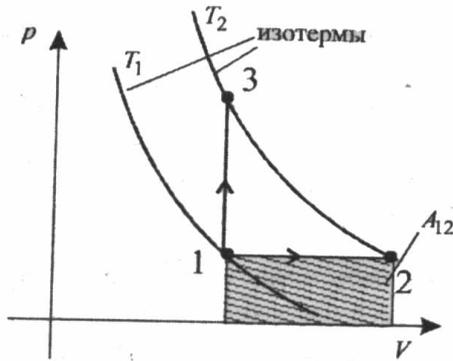
---

$\Delta Q - ?$

**Решение:**

Изобразим два процесса: изобарный 1-2 и изохорный 1-3 в координатах  $p, V$ .

Это удобно, так как в этом случае работа газа равна площади под кривой процесса.



$$\Delta Q = Q_{12} - Q_{13},$$

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

где  $\Delta U$  - изменение внутренней энергии газа,  $A$  - работа, совершенная газом. Так как и в процессе 1-2 и в процессе 1-3 температура газа повышается на величину  $\Delta T$ , то:

$$\Delta U_{12} = \Delta U_{13} = \Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

$$\Delta T = T_2 - T_1.$$

Так как процесс 1-3 - изохорный, работа газом не совершается  $A_{13} = 0$ .

Процесс 1-2 - изобарный, при этом газ совершает работу  $A_{12} = p_1(V_2 - V_1)$ .

В соответствии с законом Менделеева-Клайперона

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

$$\text{Значит, } A_{12} = \frac{m}{M} R \Delta T.$$

$$\text{Таким образом, } Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12} = \frac{5}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

$$Q_{13} = \Delta U_{13} = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

$$\Delta Q = Q_{12} - Q_{13} = A_{12} = p_1(V_2 - V_1) = \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Теплота, переданная газу при изобарном процессе больше, чем при изохорном.

## 9.

Какое количество теплоты необходимо для изохорного нагревания гелия массой 4 кг на 100 К?

**Дано:**

$$V = \text{const}$$

$$m = 4 \text{ кг}$$

$$\Delta T = 100 \text{ К} = 10^2 \text{ К}$$

$$M = 0,004 \text{ кг/моль} =$$

$$= 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

---

Q - ?

**Решение:**

Согласно первому закону термодинамики

$$Q = \Delta U + A, \text{ где } \Delta U - \text{изменение}$$

внутренней энергии газа,  $A$  – работа газа.

$V = \text{const}$ , следовательно  $A=0$ , т.е. газ

работы не совершает. Получаем:

$$Q = \Delta U.$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT,$$

$$Q = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T,$$

$$Q = \frac{3 \cdot 4 \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \cdot 10^2 \text{ К}}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} \approx 1,25 \cdot 10^6 \text{ Дж},$$

$$Q \approx 1246,5 \text{ кДж} \approx 1,25 \text{ МДж}.$$

## 10.

При изотермическом расширении газ совершил работу, равную 20 Дж. Какое количество теплоты сообщено газу?

**Дано:**

$$A = 20 \text{ Дж}$$
$$T = \text{const}$$

---

Q - ?

**Решение:**

Согласно первому закону термодинамики

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

$T = \text{const}$ , следовательно  $\Delta T = 0$ . Значит, внутренняя энергия газа не изменилась:

$$\Delta U = 0.$$

$$Q = A,$$

$$Q = 20 \text{ Дж}.$$

## 11.

Вычислите увеличение внутренней энергии водорода массой 2 кг при изобарном его нагревании на 10 К. (Удельная теплоемкость водорода при постоянном давлении равна 14 кДж/(кг·К)).

**Дано:**

$$m = 2 \text{ кг}$$

$$p = \text{const}$$

$$\Delta T = 10 \text{ К}$$

$$c = 14 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

---

$\Delta U$  - ?

**Решение:**

$$Q = \Delta U + A, \Delta U = Q - A, \text{ где}$$

$A$  – работа, совершенная газом и вычисляемая при изобарном процессе по формуле  $A = p\Delta V$ .

$\Delta V$  можно вычислить с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M}RT, \Delta V = \frac{m}{M} \frac{R\Delta T}{p},$$

$$A = \frac{m}{M}R\Delta T.$$

$$Q = cm\Delta T \text{ (} c \text{ - удельная теплоемкость),}$$

$$\Delta U = (c - \frac{R}{M})m\Delta T,$$

$$\Delta U = \left( 1400 - \frac{8,31}{2 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 2 \cdot 10 \text{ Дж},$$

$$\Delta U \approx 2 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 200 \text{ кДж}.$$

## 12.

*В цилиндре компрессора сжимают идеальный одноатомный газ, количество вещества которого 4 моль. Определите, насколько поднялась температура газа за один ход поршня, если при этом была совершена работа 500 Дж. Процесс считайте адиабатным.*

**Дано:**

$$A' = 500 \text{ Дж} =$$

$$= 5 \cdot 10^2 \text{ Дж}$$

$$\nu = 4 \text{ моль}$$

$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

$$Q = 0$$

---


$$\Delta T - ?$$

**Решение:**

$Q = A + \Delta U$ , где  $A$  – работа, совершенная газом,  $\Delta U$  – изменение его внутренней энергии.

Если  $A'$  – работа, совершенная над газом, то  $A' = -A$ ,  $Q = \Delta U - A'$ ,  $Q = 0$ .

Следовательно,  $\Delta U = A'$ .

Изменение внутренней энергии газа вычислим по формуле:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T, \quad \frac{3}{2} \nu R \Delta T = A'.$$

$$\Delta T = \frac{2A'}{3\nu R}, \quad \Delta T = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^2}{3 \cdot 4 \cdot 8,31} \text{ К}, \quad \Delta T \approx 10 \text{ К}.$$

## 13.

*В калориметр, содержащий воду массой 0,25 кг при температуре 25 °С, впускают водяной пар массой 10 г при*

температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какая температура установится в калориметре, если его теплоемкость  $1000\text{ Дж/К}$ ?

**Дано:**

$$m_1 = 0,25\text{ кг} = 2,5 \cdot 10^{-1}\text{ кг}$$

$$m_2 = 0,01\text{ кг} = 1 \cdot 10^{-1}\text{ кг}$$

$$T_1 = 298\text{ К} = 2,98 \cdot 10^2\text{ К}$$

$$T_2 = 373\text{ К} = 3,73 \cdot 10^2\text{ К}$$

$$c_v = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{моль}}$$

$$r = 2,256 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$C = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$T - ? \quad t - ?$$

**Решение:**

После установления теплового равновесия вода нагреется до некоторой температуры  $T$ , водяной пар конденсируется и охладится до температуры  $T$ , температура калориметра поднимется до  $T$ .

Запишем уравнение теплового баланса в виде:  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$ , где

$Q_1 = c_v m_1 (T - T_1)$  - теплота, которую получает вода,

$Q_2 = C(T - T_1)$  - теплота, которую получает калориметр.

$Q_3 = -rm_2 + c_v m_2 (T - T_2)$  - теплота, которую отдает пар. Здесь  $-rm_2$  - теплота конденсации,  $c_v m_2 (T - T_2)$  - теплота, которую отдает вода, образовавшаяся при конденсации пара.

$$c_v m_1 (T - T_1) + C(T - T_1) - rm_2 + c_v m_2 (T - T_2) = 0,$$

$$T(c_v m_1 + C + c_v m_2) = rm_2 + CT_1 + c_v m_1 T_1 + c_v m_2 T_2$$

$$T = \frac{rm_2 + CT_1 + c_v (m_1 T_1 + m_2 T_2)}{c_v m_1 + C + c_v m_2},$$

$$T = \frac{2,256 \cdot 10^6 \cdot 10^{-2} + 10^3 \cdot 298 + 4,2 \cdot 10^3 (2,5 \cdot 10^{-1} \cdot 298 + 10^{-2} \cdot 373)}{4,2 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-1} + 10^3 + 4,2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-2}} \text{ К};$$

$$T \approx 310,3 \text{ К}.$$

$$t = (T - 273) \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t \approx 37,3 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

**Замечание:** возможна такая ситуация, когда конденсируется не весь пар, а лишь его часть. Это происходит в том случае, если пара много, и теплоты, выделившейся в результате конденсации его

части, достаточно для нагревания воды и калориметра до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В этом случае задачу надо было бы решать по-другому. Решение задачи способом, указанным выше, привело бы к очевидно неправильному решению  $T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 14.

*В калориметре находится вода массой  $0,4\text{ кг}$  при температуре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В воду положили лед массой  $0,6\text{ кг}$  при температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . какая температура установится в калориметре, если его теплоемкость ничтожно мала?*

### Дано:

$$m_1 = 0,4\text{ кг} = 4 \cdot 10^{-1}\text{ кг}$$

$$m_2 = 0,6\text{ кг} = 6 \cdot 10^{-1}\text{ кг}$$

$$T_1 = (273+10)\text{ К} = 283\text{ К} = 2,83 \cdot 10^2\text{ К}$$

$$T_2 = (273-40)\text{ К} = 233\text{ К} = 2,33 \cdot 10^2\text{ К}$$

$$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_2 = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda = 3,34 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$$

T - ?

### Решение:

Сравним энергию, которую должна отдать вода для охлаждения ее до  $0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273\text{ К} = T_0$ :

$$Q_1 = c_1 m_1 (T_0 - T_1),$$

и энергию, необходимую для нагревания льда до  $T_0 = 273\text{ К}$ :

$$Q_2 = c_2 m_2 (T_2 - T_0).$$

$$Q_1 = 1,68 \cdot 10^4\text{ Дж}, \quad Q_2 = 5,04 \cdot 10^4\text{ Дж}.$$

$Q_2 > Q_1$ . Это означает, что даже когда вся вода охладится до  $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и все тепло, высвободившееся при этом, перейдет ко льду, его температура останется отрицательной. Значит, часть воды (или даже вся вода) должна кристаллизоваться.

Вычислим  $Q_3$  – теплоту, которую необходимо отнять у воды для того, чтобы вся вода перешла в лед.

$$Q_3 = Q_1 + \lambda m_1 = 1,68 \cdot 10^4\text{ Дж} + 3,34 \cdot 10^5 \cdot 0,4\text{ Дж} \approx 1,50 \cdot 10^5\text{ Дж}.$$

$Q_3 > Q_2$  — это означает, что не вся вода может кристаллизоваться. После установления равновесия в калориметре будут одновременно существовать две фазы – лед и вода при температуре  $T = 273 \text{ К} = 0 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Определим массы воды и льда в калориметре.

$$c_1 m_1 (T_0 - T_1) + \lambda m_x = -c_2 m_2 (T_2 - T_0),$$

где  $m_x$  – масса воды, перешедшей в лед.

$$m_x = \frac{c_2 m_2 (T_0 - T_1) + c_1 m_1 (T_0 - T_1)}{\lambda},$$

$$m_x = \frac{2,1 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-1} \cdot 40 - 4,2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-1} \cdot 10}{3,34 \cdot 10^5} \text{ кг}, \quad m_x = 10^{-1} = 0,1 \text{ кг}.$$

$$m_{\text{л}} = m_2 + m_x, \quad m_{\text{л}} = 7 \cdot 10^{-1} = 0,7 \text{ кг}.$$

$$m_{\text{в}} = m_1 - m_x, \quad m_{\text{в}} = 3 \cdot 10^{-1} = 0,3 \text{ кг}.$$

Масса воды в калориметре 0,3 кг, масса льда 0,7 кг при температуре  $0 \text{ }^\circ\text{С}$ .

## 15.

Какой должна быть температура нагревателя, для того, чтобы в принципе стало возможным достижение значения КПД тепловой машины 80%, если температура холодильника  $27 \text{ }^\circ\text{С}$ ?

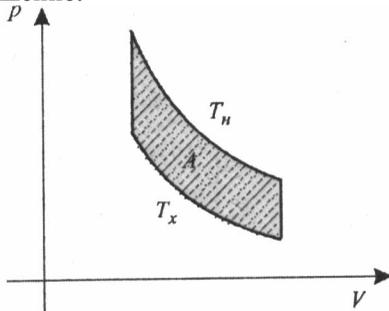
**Дано:**

$$\eta_{\text{max}} = 80\%$$

$$T_x = 300 \text{ К} = 3 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$T_n - ?$$

**Решение:**



Тепловая машина с идеальным газом в качестве рабочего тела работает с максимальным КПД, если она работает по циклу Карно. Цикл Карно состоит из двух изохор и двух изотерм. Если пренебречь всеми энергетическими потерями, кроме передачи тепла холодильнику, то КПД такой тепловой машины равен:

$$\eta_{\max} = \frac{T_n - T_x}{T_n} \cdot 100\%,$$

где  $T_n$  – температура нагревателя,  $T_x$  – температура холодильника.

$$\frac{\eta_{\max}}{100\%} = 1 - \frac{T_x}{T_n},$$

$$T_n = \frac{T_x}{1 - \frac{\eta_{\max}}{100\%}},$$

$$T_n = \frac{T_x \cdot 100\%}{100\% - \eta_{\max}},$$

$$T_n = \frac{3 \cdot 10^2 \cdot 100}{100 - 80} \text{ К}; T_n = 1,5 \cdot 10^3 \text{ К} = 1500 \text{ К}.$$

## 16.

*В процессе работы тепловой машины за некоторое время рабочим телом было получено от нагревателя количество теплоты  $Q_1 = 1,5 \cdot 10^6$  Дж, передано холодильнику  $Q_2 = -1,2 \cdot 10^6$  Дж. Вычислите КПД машины и сравните его с максимально возможным КПД, если температуры нагревателя и холодильника соответственно равны  $250^\circ\text{C}$  и  $30^\circ\text{C}$ ?*

**Дано:**

$$Q_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$Q_2 = -1,2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

$$T_n = 523 \text{ К} = 5,23 \cdot 10^2 \text{ К}$$

$$T_x = 303 \text{ К} = 3,03 \cdot 10^2 \text{ К}$$

**Решение:**

По определению КПД:

$$\eta = \frac{A}{|Q_1|} \cdot 100\%,$$

где  $A$  – работа, совершенная рабочим телом,  $Q_1$  – теплота, полученная от нагревателя.

---

$$\eta - ? \quad \eta_{\max} - ?$$

Если  $Q_2$  – теплота, отданная холодильнику, то согласно закону сохранения энергии  $A = |Q_1| - |Q_2|$ .

$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} \cdot 100\%, \quad \eta = \frac{(1,5 - 1,2) \cdot 10^6}{1,5 \cdot 10^6} \cdot 100\%,$$

$$\eta = 20\%.$$

Максимальный КПД достигается в том случае, если тепловая машина работает по циклу Карно, и равен:

$$\eta_{\max} = \frac{T_n - T_x}{T_n} \cdot 100\%, \quad \eta_{\max} = \frac{5,23 \cdot 10^2 - 3,03 \cdot 10^2}{5,23 \cdot 10^2} \cdot 100\%;$$

$$\eta_{\max} \approx 42\%.$$

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

## Глава VII. Электростатика

### Упражнение 7.

1.

*Известно, что стеклянная палочка, потертая о шелк, заряжается положительно. Определите экспериментально знак заряда пластмассовой ручки, потертой о шерсть.*

**Ответ:**

*Для определения знака пластмассовой ручки (наэлектризованной о шерсть) необходимо не касаясь поднести ее к стеклянной палочке с положительным зарядом. Если она притянется, то ее знак – «-», если же отталкивается, то знак – «+». В нашем случае стеклянная палочка и ручка притягиваются, следовательно, знак заряда – «-».*

2.

*Определите силу взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода, если расстояние между ними равно  $0,5 \cdot 10^{-8}$  см.*

**Дано:**

$$r = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ см} =$$

$$= 5 \cdot 10^{-11} \text{ м}$$

$$q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

**Решение:**

Атом водорода содержит 1 электрон и 1 протон, при этом он электронейтрален.

Поэтому заряд его ядра равен по модулю и противоположен по знаку

заряду электрона:

$$q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

F - ?

Согласно закону Кулона:

$$F = k \frac{|q_p| \cdot |q_e|}{r^2} = k \frac{e^2}{r^2},$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  - электрическая постоянная.

$$F = \frac{1}{4\pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(5 \cdot 10^{-11})^2} \text{ Н;}$$

$$F = 9,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н.}$$

$$[F] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}^2} \right] = [\text{Н}]$$

Так как знаки зарядов электрона и протона противоположны, электрон и протон притягиваются.

### 3.

*Во сколько раз кулоновская сила взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода больше силы их гравитационного взаимодействия? Масса электрона  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг, а масса протона  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. Гравитационная постоянная  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$ .*

**Дано:**

$$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$
$$m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

**Решение:**

Воспользуемся законом всемирного тяготения и законом Кулона.

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$$

$$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$q_{\text{я}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$F_m = G \frac{m_p \cdot m_e}{r^2},$$

$$F_{\kappa} = k \frac{|q_e| \cdot |q_{\text{я}}|}{r^2},$$

$$\frac{F_{\kappa}}{F_m} = \frac{k \frac{|q_e| \cdot |q_{\text{я}}|}{r^2}}{G \frac{m_p \cdot m_e}{r^2}},$$

$$\frac{F_{\kappa}}{F_m} = \frac{k |q_e| \cdot |q_{\text{я}}|}{G \cdot m_p \cdot m_e},$$

$$\frac{F_{\kappa}}{F_m} - ?$$

$$\frac{F_{\kappa}}{F_m} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}},$$

$$\frac{F_{\kappa}}{F_m} \approx 2,3 \cdot 10^{39} - \text{сила электростатического притяжения на много}$$

порядков больше силы гравитационного притяжения.

#### 4.

*С какой силой взаимодействовали бы две капли воды на расстоянии 1 км, если бы удалось передать одной из капель 1% всех электронов, содержащихся в другой капле массой 0,03 г?*

**Дано:**

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$r = 1 \text{ км} = 10^3 \text{ м}$$

$$m = 0,03 \text{ г} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$$

$$\eta = 1\%$$

$$N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$M = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$$

**Решение:**

При переносе с одной электро-нейтральной капли на другую заряда определенного знака электронейтральность каждой из капель нарушается. В этом случае

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

заряды капель будут одинаковы по модулю и противоположны по знаку, и они будут взаимно притягиваться. Согласно закону

$F_k$  - ?

Кулона, при этом сила притяжения

капель воды будет равна:  $F_k = k \frac{q^2}{r^2}$ . Найдем модуль зарядов

капель:  $q = \frac{\eta}{100\%} q_n$ , где  $q_n$  - общий заряд всех электронов во второй капле воды. В молекуле воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) содержится 10 электронов: 8 - кислорода, 2- водорода. Следовательно,  $q_n = 10 \cdot e \cdot N$ , где  $N = N_A \frac{m}{M}$  - число молекул.

$$q = \frac{\eta \cdot 10 \cdot e \cdot N_A \cdot m}{100\% \cdot M},$$

$$F_k = k \frac{10^2 \cdot e^2 \cdot N_A^2 \cdot m^2}{M^2 \cdot r^2} \left( \frac{\eta}{100\%} \right)^2,$$

$$F_k = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2 \cdot (6 \cdot 10^{23})^2 \cdot (3 \cdot 10^{-5})^2}{(0,018)^2 \cdot 10^6 \cdot 10^4} \text{Н},$$

$$F_k \approx 2,3 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

$$[F] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл}^2 \cdot \text{кг}^2 \cdot \text{моль}^2}{\text{Кл}^2 \cdot \text{моль}^2 \cdot \text{кг}^2 \cdot \text{м}^2} \right] = [\text{Н}]$$

## 5.

Два одинаковых шарика находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Заряд одного из них  $9 \cdot 10^{-9}$  Кл, а заряд другого  $-2 \cdot 10^{-9}$  Кл. Шарик привели в соприкосновение и вновь раздвинули на такое же расстояние. Найдите силы их взаимодействия до и после соприкосновения.

**Дано:**

$$q_1 = 9 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 40 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-1} \text{ м}$$

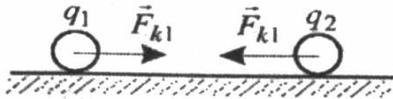
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

$F_k$  - ?

**Решение:**

До соприкосновения заряды шариков противоположны  $q_1 > 0$ ,  $q_2 < 0$ , поэтому шарики притягиваются с силой:

$$F_{k1} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$



$$F_{k1} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 9 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{(4 \cdot 10^{-1})^2} \text{ Н}; F_{k1} \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ Н}.$$

После соприкосновения заряды шариков стали одинаковые. Так как система из двух шариков замкнутая, для нее выполняется закон сохранения алгебраической суммы заряда:  $q_1 + q_2 = 2q$ ,

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}.$$

Шарики отталкиваются с силой

$$F_{k2} = k \frac{q^2}{r^2},$$

$$F_{k2} = k \frac{(q_1 + q_2)^2}{4r^2},$$

$$F_{к2} = \frac{9 \cdot 10^9 ((9-2) \cdot 10^{-9})^2}{4 \cdot (4 \cdot 10^{-1})^2} \text{ Н}; F_{к2} \approx 6,9 \cdot 10^{-7} \text{ Н}.$$

**6.**

Точечные заряды  $1,0 \cdot 10^{-8}$  Кл и  $2,0 \cdot 10^{-8}$  Кл закреплены на расстоянии 1 м друг от друга в вакууме. На прямой, соединяющей эти заряды, на одинаковом расстоянии от каждого из них помещено маленькое тело, несущее заряд  $-3 \cdot 10^{-9}$  Кл. Каковы модуль и направление силы, действующей на тело?

**Дано:**

$$q_1 = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

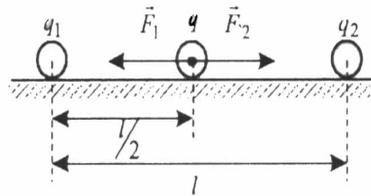
$$q_2 = 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$l = 1 \text{ м}$$

$$q = -3 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

**Решение:**



На заряд  $q$  со стороны заряда  $q_2$  действует сила притяжения:

$$F_2 = k \frac{4 \cdot |q| \cdot |q_2|}{l^2}.$$

$F - ?$

Со стороны заряда  $q_1$  сила притяжения:

$$F_1 = k \frac{4 \cdot |q| \cdot |q_1|}{l^2},$$

Направленная в противоположную сторону. Равнодействующая этих сил направлена в сторону второго заряда (так как  $q_2 > q_1$ ) и равна:

$$F = F_2 - F_1 = \frac{k \cdot 4 \cdot |q|}{l^2} (|q_2| - |q_1|),$$

$$F = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 10^{-9}}{1} ((2-1) \cdot 10^{-8}) \text{Н};$$

$$F \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{Н}.$$

## Глава VIII Законы постоянного тока

### Упражнение 8.

1.

В направленном вертикально вниз однородном электрическом поле с напряженностью  $1,3 \cdot 10^5$  В/м капля жидкости массой  $2 \cdot 10^{-9}$  г оказалась в равновесии. Найдите заряд капли и число избыточных электронов на ней.

Дано:

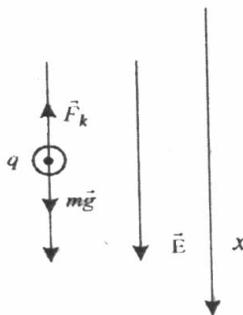
$$E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ В/м}$$

$$m = 2 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Решение:



q - ? n - ?

Так как капля находится в равновесии, то равнодействующая всех сил, действующих на нее, равна 0. На каплю действуют сила тяжести  $\vec{F}_T$  и кулоновская сила  $\vec{F}_K$ .

$$\vec{F}_T = m\vec{g}, \quad \vec{F}_K = \vec{E}q,$$

где  $\vec{E}$  - напряженность электрического поля.

$$\vec{F}_T + \vec{F}_K = 0, \quad F_{Tx} = mg, \quad F_{Kx} = qE_x = qE.$$

$$F_{Tx} + F_{Kx} = 0, \quad mg + qE = 0, \quad q = -\frac{mg}{E};$$

$$q = -\frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8}{1,3 \cdot 10^5} \text{ КГ}$$

$$q \approx -1,5 \cdot 10^{-16} \text{ Кл.}$$

$$n = \frac{q}{q_e}, \quad n = \frac{mg}{E \cdot |q_e|}.$$

$$n = \frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot 9,8}{1,3 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}; \quad n \approx 940 \text{ электронов.}$$

## 2.

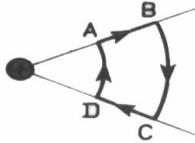
Почему заряженная расческа притягивает электрически нейтральные кусочки бумаги?

### Ответ:

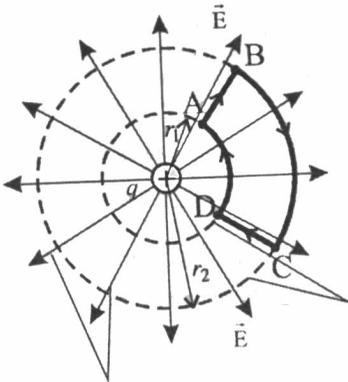
*Как мы знаем, электрическое поле возникает вокруг любого заряженного тела (в задаче - расчески). Оно действует на нейтральные кусочки бумаги, являющиеся полярными диэлектриками. Несмотря на то, что в целом кусочек электронейтрален, в каждом кусочке происходит поляризация (т.е. перемещение зарядов). Та поверхность бумаги к которой подносится расческа имеет противоположный знак заряда расчески. Расческа пластмассовая, значит заряжена она отрицательно. То есть та часть бумаги, которая лежит ближе к расческе имеет положительный заряд, а противоположная – отрицательный.*

3.

Электрический заряд  $q_1 > 0$  переместили по замкнутому контуру ABCD в поле точечного заряда  $q_2 > 0$  (рисунок). На каких участках работа поля по перемещению заряда была положительной? Отрицательной? Равной нулю? Как изменялась потенциальная энергия системы? Чему равна полная работа по перемещению заряда?



Решение:



Эквипотенциальные  
поверхности

Силовые  
линии поля

заряд  $q_2 > 0$  создает в окружающем пространстве радиально-симметричное электрическое поле, направленное от заряда.

Напряженность электрического поля равна  $E = k \frac{|q_2|}{r^2}$ . Заряд  $q_1$  тоже положительный, поэтому сила, с которой поле заряда  $q_2$  действует на заряд  $q_1$ , направлена так же как и напряженность поля  $\vec{E}$ .

На участке  $AB$  заряд  $q_1 > 0$  перемещается в поле заряда  $q_2 > 0$  вдоль силовой линии поля, то есть по направлению напряженности поля  $\vec{E}$ . При этом поле совершает положительную работу. Ее значение можно вычислить с помощью закона сохранения энергии:

$$A_{AB} = -(W_{pB} - W_{pA}) = -q_1(\varphi_B - \varphi_A),$$

где  $W_{pB}$ ,  $W_{pA}$  – энергия заряда  $q_1$  в поле заряда  $q_2$  в точках А и В, а  $\varphi_B$ ,  $\varphi_A$  – потенциал поля заряда  $q_2$  в точках А и В. Потенциал поля точечного заряда  $q_2$  равен:

$$\varphi_B = \frac{kq_2}{r_2},$$

$$\varphi_A = \frac{kq_2}{r_1}$$

где  $r_1$ ,  $r_2$  – расстояния от заряда  $q_2$  до точек А и В.

$$A_{AB} = -q_1 \left( k \frac{q_2}{r_2} - \frac{kq_2}{r_1} \right) = kq_1q_2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

Так как  $r_1 < r_2$   $A_{AB} > 0$ .

При этом потенциальная энергия системы уменьшилась:

$$W_{pB} = W_{pA} - A_{AB} \langle W_{pA} \rangle$$

На участке  $CD$  заряд  $q_2$  движется противоположно направлению силовых линий поля. При этом совершается работа  $A_{CD} < 0$ . В этом случае потенциальная энергия системы увеличилась:

$$W_{pD} = W_{pC} - A_{CD} \rangle W_{pC}$$

На участке  $BC$  и  $DA$  заряд движется перпендикулярно силовым линиям поля, потому работа на этих участках не совершается:

$$A_{BC} = A_{DA} = 0.$$

Потенциал поля заряда  $q_2$  и потенциальная энергия системы на этих участках не меняется. Работа электростатического поля не зависит от траектории движения заряда, а зависит только от его начального и конечного положения. Поэтому полная работа по перемещению заряда по замкнутой траектории равна 0:

$$A_{ABCD} = -(W_{pA} - W_{pA}) = -q_1(\varphi_A - \varphi_A) = 0$$

$$\text{Соответственно, } A_{CD} = -A_{AB} = -kq_1q_2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

#### 4.

*Двигаясь в электрическом поле, электрон перешел из одной точки в другую, потенциал которой выше на 1В. Насколько изменилась кинетическая энергия электрона? Потенциальная?*

**Дано:**

$$\Delta\varphi = 1 \text{ В}$$

$$q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

**Решение:**

$$A = q_e(\varphi_1 - \varphi_2) = -q_e\Delta\varphi,$$

$$\text{где } \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

По теореме о кинетической энергии

$$\Delta W_k = A, \Delta W_p = -q_e\Delta\varphi,$$

$$\Delta W_k - ?$$

$$\Delta W_p - ?$$

$$\Delta W_k = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Кинетическая энергия электрона увеличилась, так как поле совершило положительную работу.

По определению потенциальной энергии  $A = -\Delta W_p$ .

$$\Delta W_p = -A, \quad \Delta W_p = q_e\Delta\varphi,$$

$$\Delta W_p = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потенциальная энергия электрона уменьшилась.

### 5.

Точечные заряды  $q_1 > 0$  и  $q_2 < 0$  расположены в двух вершинах равностороннего треугольника со стороной  $r$ . Найдите модуль вектора напряженности в третьей вершине, если диэлектрическая проницаемость среды равна  $\epsilon$ .

**Дано:**

$$q_1 > 0, q_2 < 0$$

$$r, \epsilon, \epsilon_0, E - ?$$

**Решение:**

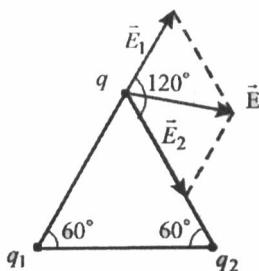
Согласно принципу суперпозиций полей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

$E_1 = k \frac{q_1}{\epsilon r^2}$  так как  $q_1 > 0$   $\vec{E}_1$  направлена от заряда  $q_1$ .

$E_2 = k \frac{q_2}{\epsilon r^2}$  так как  $q_2 < 0$   $\vec{E}_2$  направлена от заряда  $q_2$ .

Угол между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  равен  $120^\circ$ , поэтому



$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cdot \cos 120^\circ, \quad E^2 = E_1^2 + E_2^2 + E_1E_2,$$

$$E^2 = k^2 \frac{q_1^2}{\epsilon^2 r^4} + k \frac{q_2^2}{\epsilon^2 r^4} + k \frac{q_1 q_2}{\epsilon^2 r^4},$$

$$E^2 = \frac{k^2}{\epsilon^2 r^4} (q_1^2 + q_2^2 + q_1 q_2),$$

$$E = \frac{k}{\epsilon r^2} \sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_1 q_2},$$

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

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} - \text{электрическая постоянная.}$$

$$E = \frac{\sqrt{q_1^2 + q_2^2 + q_1 q_2}}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}.$$

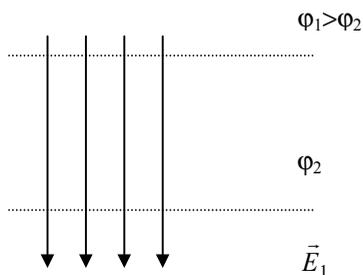
**6.**

*Потенциал электростатического поля возрастает в направлении снизу вверх. Куда направлен вектор напряженности поля?*

**Решение:**

Вектор напряженности электростатического поля направлен в сторону убывания потенциала:  $\Phi_1 > \Phi_2$ .

*Если снизу вверх потенциал возрастает, то вектор напряженности направлен сверху вниз.*



7.

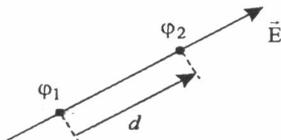
Разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 3 см друг от друга, равна 120 В. Найдите напряженность электростатического поля, если известно, что поле однородно.

Дано:

$$U = 120 \text{ В}$$

$$d = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м}$$

Решение:



$E$  - ?

Рассмотрим перемещение заряда  $q$  из одной точки в другую. Работа сил электрического поля при перемещении заряда  $q$  равна  $qU$ , где  $U$  – разность потенциалов начальной и конечной точки. С другой стороны, эту работу можно выразить через напряженность электрического поля  $\vec{E}$ :  $A = qEd$ , здесь  $qE$  – сила, с которой поле действует на заряд  $q$ .

$d$  – расстояние, пройденное зарядом.

$$qEd = qU,$$

$$E = \frac{U}{d};$$

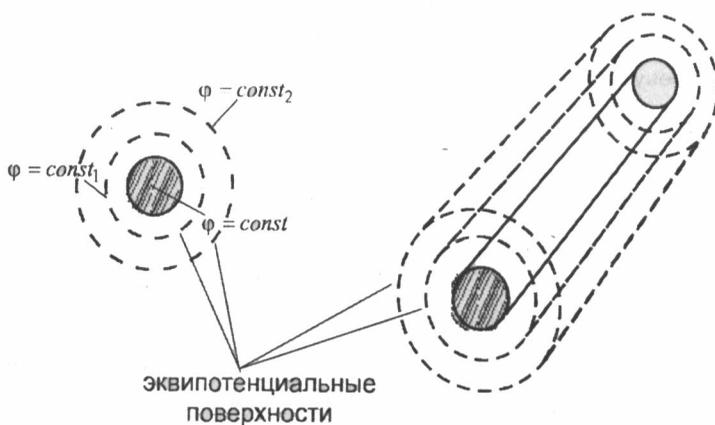
$$E = \frac{120}{0,03} \text{ В/м},$$

$$E = 400 \text{ В/м} = 4 \cdot 10^3 \text{ В/м}.$$

8.

Изобразите эквипотенциальные поверхности бесконечного проводящего равномерно заряженного цилиндра.

Ответ:



Так как все точки проводника имеют один и тот же потенциал, любая поверхность внутри цилиндра является эквипотенциальной. Рассмотрим некоторую точку  $A$  вне цилиндра. При сдвиге точки  $A$  параллельно оси цилиндра потенциал поля не изменится, так как не изменится расположение зарядов относительно точки  $A$ . То есть любая прямая, параллельная оси цилиндра эквипотенциальна. Любая окружность, лежащая в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра с центром на его оси тоже эквипотенциальна. Значит любая цилиндрическая поверхность, ось которой является осью данного цилиндра, эквипотенциальна.

## 9.

Электрон, двигаясь в электрическом поле, увеличил скорость с  $v_1 = 1 \cdot 10^7$  м/с до  $v_2 \approx 3 \cdot 10^7$  м/с. Найдите разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения электрона. Отношение заряда электрона к его массе равно:

$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

**Дано:**

$$v_1 = 1 \cdot 10^7 \text{ м/с,}$$

$$v_2 = 3 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

$$q_e = -e$$

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = ?$$

**Решение:**

По теореме о кинетической энергии работа электрического поля равна изменению кинетической энергии электрона:

$$A = \Delta W_{\kappa},$$

$$\Delta W_{\kappa} = W_{\kappa 2} - W_{\kappa 1},$$

$$W_{\kappa 1} = \frac{m v_1^2}{2},$$

$$W_{\kappa 2} = \frac{m v_2^2}{2};$$

$$\Delta W_{\kappa} = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2),$$

$$A = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2),$$

С другой стороны, работу электрического поля по перемещению электрона можно выразить через разность потенциалов поля в точках 2 и 1.

$$A = q_e \cdot U,$$

$$q_e U = \frac{m}{2}(v_2^2 - v_1^2),$$

$$U = \frac{m}{2q_e}(v_2^2 - v_1^2),$$

$$U = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \frac{q_e}{m}},$$

$$U = - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \frac{e}{m}};$$

$$U = \frac{-(9-1) \cdot 10^{14}}{2 \cdot 1,76 \cdot 10^{11}} \text{ В},$$

$$U \approx -2,3 \cdot 10^3 \text{ В}.$$

$$[U] = \left[ \frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг}}{\text{с}^2 \cdot \text{Кл}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \right] = [\text{В}]$$

## Глава IX Магнитное поле

### Упражнение 9.

#### 1.

Разность потенциалов между обкладками конденсатора емкостью 0,1 мкФ изменилась на 175 В. Определите изменение заряда конденсатора.

**Дано:**

$$\begin{aligned} C &= 0,1 \text{ мкФ} = \\ &= 1 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \\ U &= 175 \text{ В} = \\ &= 1,75 \cdot 10^2 \text{ В} \end{aligned}$$

$\Delta q$  - ?

**Решение:**

По определению емкости

$$\begin{aligned} C &= \frac{q}{U}, \\ q &= CU. \end{aligned}$$

При изменении заряда конденсатора его емкость не меняется.

$$q_1 = U_1 C, \quad q_2 = U_2 C;$$

$$\Delta q = q_2 - q_1,$$

$$\Delta q = c(U_2 - U_1) = c\Delta U,$$

$$\Delta q = 1 \cdot 10^{-7} \cdot 1,75 \cdot 10^2 \text{ Кл}, \quad \Delta q = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}.$$

## 2.

Заряд плоского конденсатора со слюдяным диэлектриком равен  $2,7 \cdot 10^{-4}$  Кл. Расстояние между пластинами конденсатора 0,23 мм, а его емкость без диэлектрика 0,01 мкФ. Диэлектрическая проницаемость слюды равна 7. Найдите напряженность поля в диэлектрике.

**Дано:**

$$\begin{aligned}q &= 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Кл} \\d &= 0,23 \text{ мм} = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ м} \\c &= 0,01 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Ф} \\ \epsilon &= 7\end{aligned}$$

Е - ?

**Решение:**

По определению диэлектрической проницаемости среды  $E = \frac{E_0}{\epsilon}$ , где  $E_0$  – напряженность поля без диэлектрика.

$$E_0 = \frac{U}{d}, U = \frac{q}{c}, E = \frac{q}{cd\epsilon};$$

$$E = \frac{2,7 \cdot 10^{-4}}{10^{-8} \cdot 2,3 \cdot 10^{-4} \cdot 7} \text{ В/м},$$

$$E = 1,7 \cdot 10^7 \text{ В/м} = 1,7 \cdot 10^7 \text{ Н/Кл.}$$

## 3.

В пространство между пластинами плоского конденсатора влетает электрон со скоростью  $2 \cdot 10^7$  м/с, направленной параллельно пластинам конденсатора. На какое расстояние по направлению к положительно заряженной пластине сместится электрон за время движения внутри конденсатора, если его длина равна 0,05 м и разность потенциалов между пластинами 200 В?

Расстояние между пластинами конденсатора равно  $0,02$  м.

Отношение заряда электрона к его массе равно  $1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

**Дано:**

$$v_0 = 2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$$

$$l = 0,05 \text{ м} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$U = 200 \text{ В} = 2 \cdot 10^2 \text{ В}$$

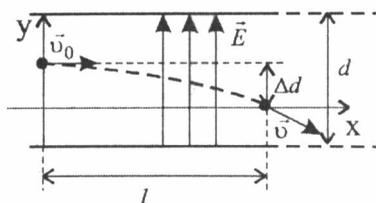
$$d = 0,02 \text{ м} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

$$q_e = -e$$

$\Delta d - ?$

**Решение:**



Направим ось  $x$  по направлению начальной скорости электрона, а ось  $y$  перпендикулярно пластинам конденсатора.

Напряженность электрического поля  $\vec{E}$  направлена вдоль оси  $y$ .  
Запишем уравнение Ньютона для электрона в электрическом поле.

$$m\vec{a} = q_e\vec{E} = -e\vec{E};$$

$$x : m a_x = -eE_x = 0,$$

$$y : m a_y = -eE_y = -eE.$$

Вдоль оси  $x$  электрон движется равномерно со скоростью  $v_{0x} = v_0$ ,

а вдоль оси  $y$  равноускоренно с ускорением  $a_y = -\frac{eE}{m}$ .

$$x = v_0 t, y = \Delta d - \frac{eE}{2m} t^2, \text{ здесь } x_0 = 0, y_0 = \Delta d.$$

Пусть в момент времени  $t$  электрон вылетает из конденсатора,

$$\text{тогда } t = v_0 \cdot t, t = \frac{l}{v_0}.$$

$$y(t) = 0 = \Delta d + \frac{a_y t^2}{2},$$

$$\Delta d = -\frac{a_y l^2}{2v_0^2}, \Delta d = -\frac{eEl^2}{2mv_0^2}.$$

Для однородного электростатического поля  $E = \frac{U}{d}$ ,

$$\Delta d = \frac{Uel^2}{2 \cdot dm \cdot v_0^2};$$

$$\Delta d = \frac{2 \cdot 10^2 \cdot 1,76 \cdot 10^{11} \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{14}} \text{ м};$$

$$\Delta d = 5,5 \text{ м} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

$$[d] = \left[ \frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{с}^2}{\text{Кл} \cdot \text{м} \cdot \text{кг}} \right] = [\text{м}]$$

$$[B] = \left[ \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \right].$$

#### 4.

Плоский конденсатор зарядили при помощи источника тока напряжением  $U = 200 \text{ В}$ . Затем конденсатор был отключен от этого источника тока. Каким станет напряжение  $U_1$  между пластинами, если расстояние между ними увеличить от первоначального  $d = 0,2 \text{ мм}$  до  $d_1 = 0,7 \text{ мм}$ , а пространство между пластинами заполнить слюдой? Диэлектрическая проницаемость слюды  $\epsilon = 7$ .

**Дано:**

$$U_0 = 200 \text{ В} = 2 \cdot 10^2 \text{ В}$$

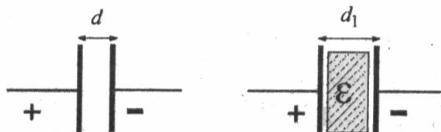
$$\epsilon = 7$$

$$d = 0,2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$d_1 = 0,7 \text{ мм} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$U_1 - ?$

**Решение:**



После того, как конденсатор отключили от источника питания, его заряд перестал меняться.

Найдем заряд конденсатора по формуле  $C = \frac{q}{U}$ , где

$q = C \cdot U$  - начальный заряд конденсатора. Аналогично:

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{C}{C_1} U.$$

Теперь необходимо найти изменение емкости конденсатора при увеличении расстояния между его обкладками и заполнения его слюдой. Согласно формуле 7.28 учебника, напряжение между пластинами пропорционально расстоянию между ними:  $U = E \Delta d$ .

Следовательно, при изменении расстояния между пластинами емкость конденсатора падает:

$\frac{C'_1}{C} = \frac{d}{d_1}$  ( $C'_1$  - емкость конденсатора с раздвинутыми на расстояние  $d_1$  пластинами). Кроме того, при заполнении конденсатора диэлектриком его емкость растет  $\frac{C_1}{C'_1} = \varepsilon$ , то есть

$$\frac{C_1}{C} = \frac{\varepsilon d}{d_1}.$$

Окончательно,  $U_1 = \frac{U d_1}{\varepsilon \cdot d}$ ;

$$U_1 = \frac{7 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7} \cdot 7} \cdot 200V = 100V.$$

Замечание: в данной задаче было использовано предположение о том, что напряженность поля  $\vec{E}$ , создаваемого равномерно заряженными пластинами, не меняется при изменении расстояния между ними. Это справедливо только в том случае, если расстояние между пластинами достаточно мало (по сравнению с размером пластины), и можно считать, что пластина является равномерно заряженной бесконечной плоскостью. Напряженность поля, создаваемого такой плоскостью, вычисляется по формуле:

$$E = \frac{\sigma}{2E_0}, \text{ где } \sigma - \text{поверхностная плотность заряда.}$$

Эту формулу можно получить из формулы 7.34 для объемной плотности энергии и формулы для энергии конденсатора.

Пусть  $E$  – напряженность поля, создаваемая двумя пластинами в конденсаторе ( $\varepsilon = 1$ ), тогда

$$\omega_p = \frac{\varepsilon_0 (2E)^2}{2}.$$

Полная энергия конденсатора равна

$$W_p = \omega_p \cdot d \cdot S = \frac{\varepsilon_0 (E)^2}{2} \cdot d \cdot S,$$

где  $S$  – площадь пластин конденсатора.

С другой стороны (7.31):

$$W_p = \frac{q \cdot E \cdot d}{2}.$$

Приравнявая первые части этих равенств, получим:

$$E = \frac{q}{S \cdot \varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}.$$

Для одной пластины  $E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}$ .

## 5.

*Во сколько раз изменится энергия заряженного конденсатора, отсоединенного от источника тока, если пространство между его обкладками заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 3$ ?*

**Дано:**

$$\varepsilon = 3$$

$$\frac{W_{p2}}{W_{p1}} = ?$$

$$W_{p1} = \frac{q^2}{2C_1},$$

**Решение:**

Если от конденсатора отключить источник питания, то заряд конденсатора останется постоянным,

т.е.  $q = const$  или  $q_1 = q_2 = q$ .

$$W_{p2} = \frac{q^2}{2C_2},$$

$$\frac{W_{p2}}{W_{p1}} = \frac{C_1}{C_2}, \quad \varepsilon = \frac{C_2}{C_1};$$

$$\frac{W_{p2}}{W_{p1}} = \frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{3}.$$

Энергия конденсатора уменьшится в 3 раза.

## 6.

*Определите плотность энергии электрического поля конденсатора, упомянутого в задаче 4, до раздвижения пластин.*

**Дано:**

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

$$d = 0,2 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$U = 200 \text{ В} = 2 \cdot 10^2 \text{ В}$$

$$\varepsilon = 1$$

**Решение:**

Согласно формуле 7.34 учебника

$$\omega_p = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot E^2}{2}, \quad \text{т.к. } \varepsilon = 1,$$

$$\omega_p = \frac{\varepsilon_0 \cdot E^2}{2},$$

$$E = \frac{U}{d},$$

$$\omega_p = \frac{\varepsilon_0 U^2}{2d^2},$$

---


$$\omega_p - ?$$

$$\omega_p = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (2 \cdot 10^2)^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-8}} \text{ Дж/м}^3, \quad \omega_p \approx 4,4 \text{ Дж/м}^3.$$

$$[\omega_p] = \left[ \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{В}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\mu \cdot \text{В}^2 \cdot \text{Кл}}{\text{В} \cdot \text{м}^4} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right],$$

$$\left[ \frac{\text{Кл}}{\text{Н}} \right] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{В}} \right], \quad [\text{В} \cdot \text{Кл}] = [\text{Дж}]$$

## Глава VIII. Законы постоянного тока

### Упражнение 10.

1.

*Электроны, летящие к экрану телевизионной трубки, образуют электронный пучок. В какую сторону направлен ток в пучке?*

**Ответ:**

Примем направление движения положительно заряженных частиц за направление тока. Следовательно направление движения отрицательно заряженных частиц будет противоположным направлению движения тока. Значит ток направлен от экрана телевизионной трубки.

2.

*Определите площадь поперечного сечения и длину медного проводника, если его сопротивление 0,2 Ом, а масса 0,2 кг. Плотность меди 8900 кг/м<sup>3</sup>.*

**Дано:**

$$\begin{aligned} m &= 0,2 \text{ кг} = 2 \cdot 10^{-1} \text{ кг} \\ R &= 0,2 \text{ Ом} = 2 \cdot 10^{-1} \text{ Ом} \\ \gamma &= 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ \rho &= 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

---

$l - ?$   $S - ?$

**Решение:**

Сопротивление проводника определяется его удельным сопротивлением, длиной и площадью поперечного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Объем проводника равен:  $V = \frac{m}{\gamma}$ ,

$$V = S \cdot l, \quad l = \frac{V}{S}, \quad l = \frac{m}{\gamma \cdot S};$$

$$R = \rho \frac{m}{\gamma \cdot S^2},$$

$$S = \sqrt{\frac{\rho \cdot m}{R \cdot \gamma}};$$

$$S = \sqrt{\frac{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{-1}}{2 \cdot 10^{-1} \cdot 8,9 \cdot 10^3}} \text{ м}^2,$$

$$S \approx 1,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \approx 1,4 \text{ мм}^2.$$

$$[S] = \left[ \sqrt{\frac{[Oм \cdot м \cdot кг]}{[Oм \cdot кг / м^3]}} \right] = \left[ \sqrt{м^4} \right] = [м^2].$$

$$S = \frac{V}{l}, \quad S = \frac{m}{\gamma \cdot l},$$

$$R = \rho \frac{\gamma^2}{m}, \quad l = \sqrt{\frac{mR}{\rho \cdot \gamma}};$$

$$l = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-1} \cdot 2 \cdot 10^{-1}}{1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 8,9 \cdot 10^3}} \text{ м}, \quad l \approx 15,8 \text{ м}.$$

$$[l] = \left[ \sqrt{\frac{[кг \cdot Oм \cdot м^3]}{[Oм \cdot м \cdot кг]}} \right] = \left[ \sqrt{м^2} \right] = [м]$$

### 3.

К концам медного проводника длиной 300 м приложено напряжение 36 В. Найдите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в проводнике, если концентрация электронов проводимости меди  $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

Дано:

$$U = 36 \text{ В} = 3,6 \cdot 10 \text{ В}$$

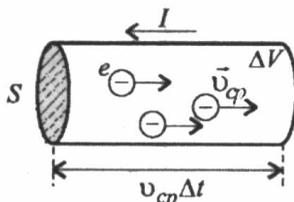
$$l = 300 \text{ м} = 3 \cdot 10^2 \text{ м}$$

$$\rho = 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$n = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Решение:



по определению сила тока равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

$$v_{cp} - ?$$

где  $\Delta q$  - заряд, перенесенный за время  $\Delta t$  через поперечное сечение проводника.

Согласно закону Ома

$$I = \frac{U}{R}, \text{ где } R = \rho \frac{l}{S},$$

$$I = \frac{U \cdot S}{\rho \cdot l} \quad (1).$$

$\Delta q = e \cdot \Delta N$ , где  $e$  - заряд электрона,  $\Delta N$  - количество электронов, прошедших через поперечное сечение проводника за время  $\Delta t$ .

$$\Delta N = n \cdot \Delta V = n \cdot S \cdot v_{cp} \cdot \Delta t,$$

$$\Delta q = e \cdot n \cdot S \cdot v_{cp} \cdot \Delta t,$$

$$\text{Тогда } I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = e \cdot n \cdot S \cdot v_{cp}.$$

Приравнявая это выражение для тока выражению (1) получим выражение для  $v_{cp}$ :

$$v_{cp} = \frac{U}{\rho \cdot l \cdot e \cdot n};$$

$$v_{cp} = \frac{3,6 \cdot 10}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,5 \cdot 10^{28} \cdot 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^2} \text{ м/с},$$

$$v_{cp} \approx 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}.$$

$$[v] = \left[ \frac{B \cdot m^3}{Kл \cdot Ом \cdot m^2} \right] = \left[ \frac{A \cdot m}{Kл} \right] = \left[ \frac{m}{c} \right],$$

$$\left[ \frac{B}{Ом} \right] = [A], \quad \left[ \frac{A}{Kл} \right] = \left[ \frac{1}{c} \right].$$

#### 4.

За некоторый промежуток времени электрическая плитка, включенная в сеть с постоянным напряжением, выделила количество теплоты  $Q$ . Какое количество теплоты выделяет за то же время две такие плитки, включенные в ту же сеть последовательно? Параллельно? Изменение сопротивления спирали в зависимости от температуры не учитывать.

**Дано:**

$Q$

$Q_1 - ?$   $Q_2 - ?$

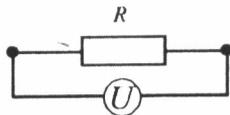
**Решение:**

Согласно закону Джоуля-Ленца количество теплоты, выделяемое одной плиткой за время  $t$ , равно

$$Q = I^2 R t, \text{ где } I \text{ определяется в}$$

соответствии с законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad Q = \frac{U^2}{R} t.$$



При последовательном подключении сопротивление цепи увеличивается в два раза:

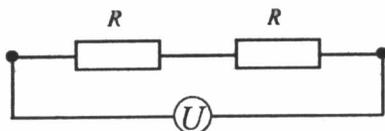
$$R_1 = R + R = 2R;$$

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} t,$$

$$Q_2 = \frac{U^2}{2R} t,$$

$$Q_1 = \frac{Q}{2}.$$

Две одинаковые плитки, соединенные последовательно и включенные в сеть с постоянным напряжением выделяют в 2 раза меньше энергии, чем при подключении одной плитки.



При параллельном соединении сопротивление цепи равно:

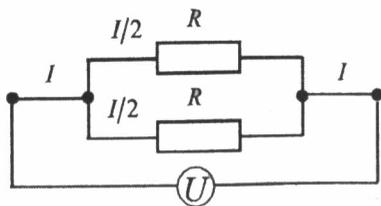
$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R}, \quad R_2 = \frac{R}{2}.$$

$$Q_2 = \frac{U^2}{R_2} t;$$

$$Q_2 = \frac{2U^2}{R} t;$$

$$Q_2 = 2Q.$$

При параллельном соединении двух одинаковых плиток выделяется в 2 раза больше энергии, чем при подключении одной плитки.



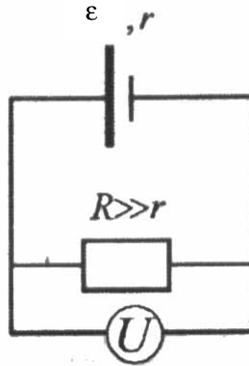
## 5.

Чему равно напряжение на клеммах гальванического элемента с ЭДС, равной  $\mathcal{E}$ , если цепь разомкнута?

**Дано:**

$$\mathcal{E}, I = 0$$

**Решение:**



$U - ?$

разрыв цепи означает подключение к ней бесконечно большого сопротивления. Замкнем мысленно цепь с ЭДС сопротивлением  $R \gg r$ , где  $r$  – сопротивление ЭДС и запишем закон Ома для полной замкнутой цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Запишем теперь закон Ома для участка цепи с сопротивлением  $R$ :

$$I = \frac{U}{R}, U = \frac{\mathcal{E} \cdot R}{R + r}.$$

При бесконечно большом  $R$  ( $\frac{r}{R}$  - бесконечно малая величина)

$$\frac{R}{R + r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}} \rightarrow 1 \text{ и } U = \mathcal{E}. \text{ При этом } I = 0 \left( \frac{U}{R} \rightarrow 0 \right)$$

6.

Чему равна сила тока при коротком замыкании аккумулятора с ЭДС  $E = 12 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 0,01 \text{ Ом}$ ?

Дано:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= 12 \text{ В} \\ r &= 0,01 \text{ Ом} = 10^{-2} \text{ Ом} \\ R &= 0\end{aligned}$$

$I_{кз} - ?$

Решение:

Запишем закон Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{r},$$

При коротком замыкании  $R = 0$ ,  
поэтому

$$I = \frac{\varepsilon}{r}; I = \frac{12}{10^{-2}} = 1200 \text{ А.}$$

7.

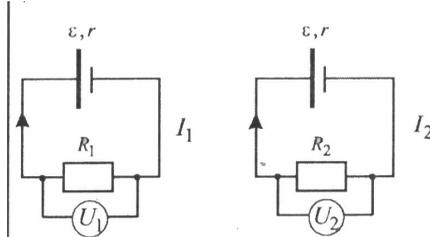
Батарейка для карманного фонаря замкнута на реостат. При сопротивлении реостата  $1,65 \text{ Ом}$  напряжение на нем равно  $3,30 \text{ В}$ , а при сопротивлении  $3,50 \text{ Ом}$  равно  $3,50 \text{ В}$ . Найдите ЭДС и внутреннее сопротивление батарейки.

Дано:

$$\begin{aligned}R_1 &= 1,65 \text{ Ом} \\ U_1 &= 3,35 \text{ В} \\ R_2 &= 3,5 \text{ Ом} \\ U_2 &= 3,5 \text{ В}\end{aligned}$$

$\varepsilon - ?$   $r - ?$

Решение:



Решим задачу с помощью закона Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

и закона Ома для участка цепи:

$$\frac{U}{R} = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Выразим ЭДС через сопротивление реостата и напряжение на нем для двух случаев:

$$\varepsilon = \frac{U_1}{R_1}(R_1 + r),$$

$$\varepsilon = \frac{U_2}{R_2}(R_2 + r),$$

Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$I = \frac{U_1 \cdot R_2 (R_1 + r)}{R_1 \cdot U_2 (R_2 + r)},$$

$$U_1 R_2 (R_1 + r) = R_1 \cdot U_2 (R_2 + r),$$

$$r = \frac{U_2 \cdot R_1 \cdot R_2 - U_1 \cdot R_2 \cdot R_1}{U_1 \cdot R_2 - U_2 \cdot R_1},$$

$$r = \frac{R_1 \cdot R_2 (U_2 - U_1)}{U_1 \cdot R_2 - U_2 \cdot R_1},$$

$$r = \frac{1,65 \cdot 3,5(3,5 - 3,3)}{3,3 \cdot 3,5 - 3,5 \cdot 1,65} \text{ Ом}, \quad r = 0,2 \text{ Ом}.$$

Подставим  $r$  в одно из уравнений для ЭДС:

$$\varepsilon = \frac{U_1}{R_1} \left( R_1 + \frac{R_1 R_2 (U_2 - U_1)}{U_1 R_2 - U_2 R_1} \right),$$

$$\varepsilon = U_1 \left( 1 + \frac{R_2 (U_2 - U_1)}{U_1 R_2 - U_2 R_1} \right)$$

$$\varepsilon = 3,3 \left( 1 + \frac{3,5(3,5 - 3,3)}{3,3 \cdot 3,5 - 3,5 \cdot 1,65} \right) \text{ В}.$$

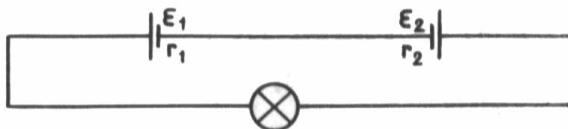
$$\varepsilon = 3,7 \text{ В}.$$

$$[r] = \left[ \frac{\text{Ом} \cdot \text{Ом} \cdot \text{В}}{\text{В} \cdot \text{Ом}} \right] = [\text{Ом}],$$

$$[\mathcal{E}] = \left[ \frac{B \cdot \text{Ом} \cdot B}{B \cdot \text{Ом}} \right] = [B]$$

8.

Гальванические элементы с ЭДС 4,50 и 1,50 В и внутренними сопротивлениями 1,50 и 0,50 Ом, соединенные, как показано на рисунке, питают лампу от карманного фонаря. Какую мощность потребляет лампа, если известно, что сопротивление ее нити в нагретом состоянии равно 23 Ом?



Дано:

$$\mathcal{E}_1 = 4,5 \text{ В}$$

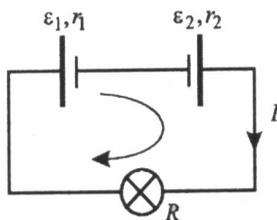
$$\mathcal{E}_2 = 1,5 \text{ В}$$

$$r_1 = 1,5 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 0,5 \text{ Ом}$$

$$R = 23 \text{ Ом}$$

Решение:



$P$  - ?

Выберем направление обхода цепи

по часовой стрелке (как показано на рисунке). Тогда ЭДС цепи равно  $\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1$ .

Запишем закон Ома для замкнутой цепи:

$$I(r_1 + r_2 + R) = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1.$$

∞

Найдем силу тока  $I$ :

$$I = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{r_1 + r_2 + R}.$$

Согласно закону Джоуля-Ленца:  $Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t$ .

Мощность – количество теплоты, выделяемое лампой в единицу времени:

$$P = \frac{Q}{\Delta t}, P = I^2 \cdot R,$$

$$P = \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{r_1 + r_2 + R} \right)^2 \cdot R,$$

$$P = \left( \frac{4,5 - 1,5}{1,5 + 0,5 + 23} \right)^2 \cdot 23 \text{ Вт}, P \approx 0,33 \text{ Вт}.$$

$$[P] = \left[ \frac{\text{В}^2 \cdot \text{Ом}}{\text{Ом}^2} \right] = \left[ \frac{\text{В}^2}{\text{Ом}} \right] = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = [\text{Вт}]$$

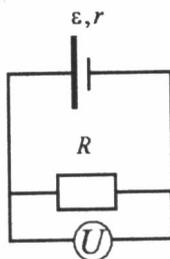
## 9.

Замкнутая цепь питается от источника с ЭДС  $\varepsilon = 6 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $0,1 \text{ Ом}$ . Постройте графики зависимости силы тока в цепи и напряжения на зажимах источника от сопротивления внешнего участка.

Дано:

$$\varepsilon = 6 \text{ В}$$
$$r = 0,1 \text{ Ом}$$

Решение:



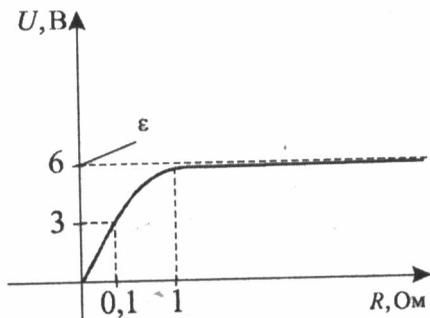
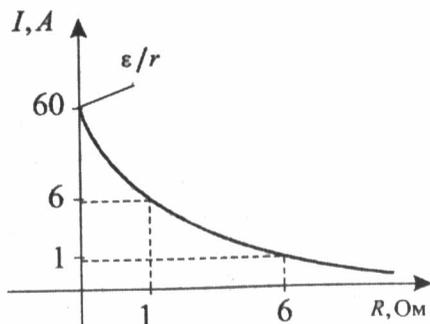
---

$$I(R) - ? \quad U(R) - ?$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}, \quad I = \frac{6}{0,1+R}, \quad \text{где } R \text{ измеряется в Ом.}$$

$$U = I \cdot R,$$

$$U = \frac{\varepsilon R}{R+r}, \quad U = \frac{6R}{0,1+R} \text{ В.}$$



## 10.

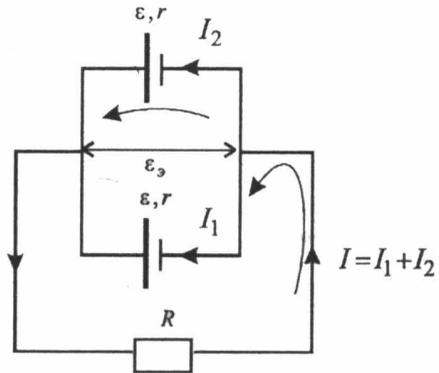
Два элемента, имеющие одинаковые ЭДС по 4,1 В и одинаковые внутренние сопротивления по 4 Ом, соединены одноименными полюсами, от которых сделаны выводы. Какую ЭДС и какое внутреннее сопротивление должен иметь элемент, которым можно было бы заменить такую батарейку?

**Дано:**

$$\varepsilon = 4,1 \text{ В}$$

$$r = 4 \text{ Ом}$$

**Решение:**



---

$$\varepsilon_3 - ? r_3 - ?$$

замкнем два источника ЭДС некоторым сопротивлением  $R$  и запишем выражение для напряжения на  $R$ :

$$U = I \cdot R.$$

С другой стороны  $U = \varepsilon - I_1 \cdot r$ ,  $U = \varepsilon - I_2 \cdot r$ ,

где  $I_1, I_2$  – токи, текущие через первый и второй элемент:

$$I = I_1 + I_2.$$

$$\varepsilon - I_1 \cdot r = \varepsilon - I_2 \cdot r,$$

$$I_1 = I_2 = \frac{I}{2}.$$

Теперь закон Ома для замкнутой цепи с двумя ЭДС можно записать в виде:

$$\varepsilon - \frac{1}{2} \cdot r \cdot I = I \cdot R; I = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{2}}.$$

Из формулы видно, что две ЭДС можно заменить эквивалентной ЭДС

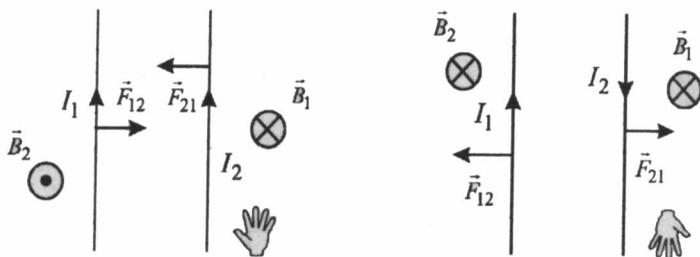
$$\varepsilon_3 = \varepsilon = 4,1 \text{ В}, r_3 = \frac{r}{2} = 2 \text{ Ом}.$$

# Глава IX. Магнитное поле

## Упражнение 11.

1.

Используя правило буравчика и правило левой руки, покажите, что токи, направленные параллельно, притягиваются, а противоположно – отталкиваются.



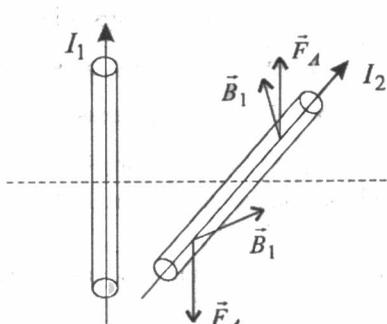
Рассмотрим два проводника с сонаправленными токами  $I_1$  и  $I_2$ , как показано на рисунке.

Согласно правилу буравчика индукция магнитного поля  $\vec{B}_1$  первого тока направлена в любой точке второго проводника перпендикулярно плоскости рисунка от нас. Согласно правилу левой руки сила Ампера  $\vec{F}_{21}$ , действующая на второй ток со стороны первого тока, направлена перпендикулярно проводникам в сторону первого проводника. Аналогично, сила Ампера  $\vec{F}_{12}$ , действующая на первый ток, направлена в сторону второго. Следовательно, в случае проводников с сонаправленными токами силы  $\vec{F}_{12}$  и  $\vec{F}_{21}$  направлены навстречу друг другу, поэтому проводники притягиваются.

Рассмотрим два проводника с противоположным направлением токов  $I_1$  и  $I_2$ . Согласно правилу буравчика индукция магнитного поля  $\vec{B}_1$  первого тока направлена в любой точке второго проводника перпендикулярно плоскости рисунка от нас. Согласно правилу левой руки сила Ампера  $\vec{F}_{21}$ , действующая на второй ток, направлена от первого тока. Аналогично, сила Ампера  $\vec{F}_{12}$ , действующая со стороны второго тока на первый, направлена от второго проводника. Следовательно, проводники с противоположно направленными токами отталкиваются.

## 2.

*По двум скрещивающимся под прямым углом прямолинейным проводникам пропускают токи  $I_1$  и  $I_2$ . Как будет изменяться расположение проводников относительно друг друга?*



Согласно правилу буравчика вектор магнитной индукции  $\vec{B}_1$  поля, создаваемого током  $I_1$ , лежит в плоскости, перпендикулярной  $I_1$  и направлен так, как показано на рисунке. Возникающая при этом сила Ампера, согласно правилу левой руки, будет вращать проводник 2 так, чтобы проводники 1 и 2 стали параллельны, и токи  $I_1, I_2$  стали сонаправленными. Аналогичная сила действует со стороны 2 проводника на 1 проводник. После того, как проводники установятся параллельно друг другу, они начнут взаимно притягиваться (см. предыдущую задачу).

Замечание: проводники начнут притягиваться друг к другу еще до того, как установятся параллельно. Как только проводники повернутся на некоторый (даже очень малый) угол, у силы Ампера появится составляющая, притягивающая проводники друг к другу.

### 3.

Проводник длиной  $l = 0,15$  м перпендикулярен вектору магнитной индукции однородного магнитного поля, модуль которого  $B = 0,4$  Тл. Сила тока в проводнике  $I = 8$  А. Найдите работу, которая была совершена при перемещении проводника на  $0,025$  м по направлению действия силы Ампера.

**Дано:**

$$l = 0,15 \text{ м} = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ м}$$

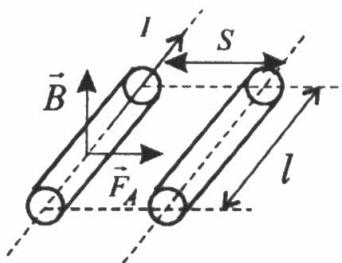
$$\alpha = 90^\circ$$

$$B = 0,4 \text{ Тл} = 4 \cdot 10^{-1} \text{ Тл}$$

$$I = 8 \text{ А}$$

$$S = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

**Решение:**



$A = ?$

Так как вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно току, возникает сила Ампера, направленная перпендикулярно как току, так и вектору магнитной индукции. При перемещении проводника на расстояние  $S$  сила Ампера  $F_A$  совершает работу:

$$A = F_A \cdot S.$$

По закону Ампера:  $F_A = IBl \sin \alpha$ .

В данном случае  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\sin \alpha = 1$ . Следовательно,  $A = IBl \cdot S$ .

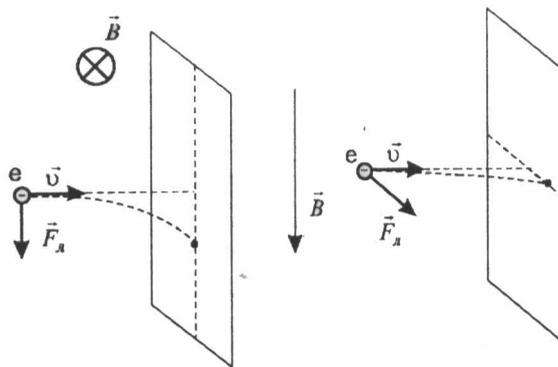
$$A = 8 \cdot 4 \cdot 10^{-1} \cdot 1,5 \cdot 10^{-1} \cdot 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}, \quad A = 0,021 \text{ Дж}.$$

$$[A] = [A \cdot \text{Тл} \cdot \text{м} \cdot \text{м}] = \left[ \frac{A \cdot \text{Н} \cdot \text{м}^2}{A \cdot \text{м}} \right] = [\text{Н} \cdot \text{м}] = [\text{Дж}], \quad [\text{Тл}] = \left[ \frac{\text{Н}}{A \cdot \text{м}} \right].$$

4.

Определите направление вектора индукции магнитного поля в горловине кинескопа.

Решение:



С помощью силы Лоренца  $\vec{F}_L$ , в кинескопе создается магнитное поле для отклонения электрона по горизонтали и вертикали. Она действует на движущуюся заряженную частицу. Используя правило левой руки мы выбираем направление вектора индукции магнитного поля, исходя из того, в какую сторону нужно отклонить электрон. Если направить вектор магнитной индукции перпендикулярно плоскости рисунка, то электрон отклонится вниз. Если направить вертикально вниз, то электрон отклонится вправо.

## Глава X. Электрический ток в различных средах

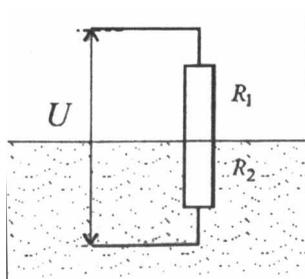
### Упражнение 12.

1.

Длинная проволока, на концах которой поддерживается постоянное напряжение, накалилась докрасна. Часть проволоки

опустили в холодную воду. Почему часть проволоки, оставшаяся над водой, нагревается сильнее?

**Решение:**



Сопротивление проволоки  $K$  равняется сопротивлению ее частей, т.е.  $R = R_1 + R_2$ . Эти две части проволоки нужно рассматривать в качестве двух последовательно включенных сопротивлений. Часть проводника  $R_2$ , опущенного в воду, охладится и, следовательно, ее сопротивление уменьшится  $R_2' < R_2$ . А так как проволока подключена к источнику постоянного напряжения, то сила тока увеличится (в соответствии с законом Ома):

$$I' = \frac{U}{R'} > I = \frac{U}{R}, \quad R' = R_1 + R_2' < R = R_1 + R_2.$$

Но в части проводника, которая осталась в воздухе, сопротивление при этом не изменилось. В этой части количество тепла увеличилось.  $Q' = I'^2 R_1 t > Q = I^2 R_1 t$ .

(Закон Джоуля Ленца).

Следовательно, та часть проволоки, которая осталась над водой нагреется сильнее.

## 2.

*Спираль электрической плитки перегорела и после соединения концов оказалась несколько короче. Как изменилось количество теплоты, выделяемое плиткой за определенной время?*

**Ответ:**

Дано начальное сопротивление плитки равное  $R_0$ . Если уменьшить длину проводника, сопротивление тоже уменьшится.

Так как спираль стали короче, ее сопротивление стало равным  $R < R_0$ . По исходным данным плитки подключается к источнику постоянного напряжения.

$$\text{Исходя из закона Джоуля-Ленца: } Q = \frac{U^2}{R} \Delta t > Q_0 = \frac{U^2}{R_0} \Delta t.$$

Количество теплоты выделяемое плиткой увеличивается.

### 3.

*Алюминиевая обмотка электромагнита при температуре  $0^\circ\text{C}$  потребляет мощность 5 кВт. Какой окажется потребляемая мощность, если во время работы температура обмотки повысилась до  $60^\circ\text{C}$ , а напряжение осталось неизменным? Что будет, если неизменным останется ток в обмотке?*

**Дано:**

$$\begin{aligned} \Delta T &= 60\text{K} = 6 \cdot 10 \text{ K} \\ P_1 &= 5 \text{ кВт} = 5 \cdot 10^3 \text{ Вт} \\ \alpha &= 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \\ 1) \quad U &= \text{const} \\ 2) \quad I &= \text{const} \end{aligned}$$

$P_2$  - ?

**Решение:**

1)  $U = \text{const}$ .  
Согласно закону Джоуля-Ленца мощность, потребляемая электромагнитом, равна:

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

Пусть до и после повышения температуры сопротивления обмотки

равны соответственно  $R_1$  и  $R_2$ , тогда:

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}, \quad P_2 = \frac{U^2}{R_2}; \quad P_2 = \frac{P_1 R_1}{R_2}, \quad R_2 = \frac{R_1}{1 - \alpha \Delta T}, \quad P_2 = P_1 (1 - \alpha \Delta T),$$

$$P_2 = 5 \cdot 10^3 (1 - 6 \cdot 10 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3}) \text{ Вт}, \quad P_2 \approx 3,9 \cdot 10^3 \text{ Вт} \approx 3,9 \text{ кВт}.$$

Мощность уменьшилась.

2)  $I = \text{const}$ .

$$P = I^2 R; \quad P_1 = I^2 R_1, \quad P_2 = I^2 R_2; \quad P_2 = \frac{P_1 R_2}{R_1}, \quad R_2 = \frac{R_1}{1 - \alpha \Delta T},$$

$$P_2 = \frac{P_1}{1 - \alpha \Delta T}, \quad P_2 = \frac{5 \cdot 10^3}{1 - 6 \cdot 10 \cdot 3,8 \cdot 10^{-3}} \text{ Вт}, \quad P_2 \approx 6,4 \cdot 10^3 \text{ Вт} \approx 6,4 \text{ кВт}.$$

Мощность увеличилась.

#### 4.

Для покрытия цинком металлических изделий в электролитическую ванну помещен цинковый электрод массой  $m = 0,01$  кг. Какой заряд должен пройти через ванну, чтобы электрод полностью израсходовался? Электрохимический эквивалент цинка  $k = 3,4 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл.

**Дано:**

$$m = 0,01 \text{ кг} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$
$$k = 3,4 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$$

q - ?

**Решение:**

В соответствии с законом электролиза:

$$m = k\Delta t, \quad q = I\Delta t.$$

$$m = kq, \quad q = \frac{m}{k};$$

$$q = \frac{1 \cdot 10^{-2}}{3,4 \cdot 10^{-7}} \text{ Кл}, \quad q = 2,94 \cdot 10^4 \text{ Кл}.$$

#### 5.

При силе тока  $1,6$  А на катоде электролитической ванны за  $10$  мин отложилась медь массой  $0,316$  г. Определите электрохимический эквивалент меди.

**Дано:**

$$I = 1,6 \text{ А}$$

$$\Delta t = 10 \text{ мин} = 6 \cdot 10^2 \text{ с}$$

$$m = 0,316 \text{ г} = 3,16 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

k - ?

**Решение:**

Согласно закону электролиза:

$$m = k\Delta t, \quad k = \frac{m}{I\Delta t},$$

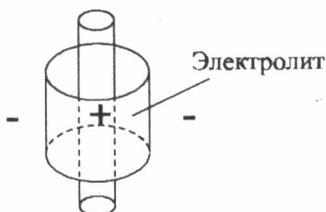
$$k = \frac{3,16 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 6 \cdot 10^2} \text{ кг/Кл},$$

$$k = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}.$$

6.

Как надо расположить электроды, чтобы электролитическим путем покрыть внутреннюю поверхность полого металлического предмета?

Ответ:



Если необходимо покрыть металлом внутреннюю поверхность предмета, нужно этот предмет применить в роли катода, и внутри ее поставить электродит с анодом.

7.

При никелировании детали в течение 2 ч сила тока, проходящего через ванну, была 25А. Электрохимический эквивалент никеля  $k=3 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл, его плотность  $\rho = 8,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Какова толщина слоя никеля, выделившегося на детали, если площадь детали  $S = 0,2$  м<sup>2</sup>?

Дано:

$$\begin{aligned} \Delta t &= 2 \text{ ч} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ с} \\ I &= 25 \text{ А} = 2,5 \cdot 10 \text{ А} \\ k &= 3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл} \\ \rho &= 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ S &= 0,2 \text{ м} = 2 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Решение:

Запишем закон электролиза:

$$m = k \Delta t, \quad m = \rho V = \rho \cdot S \cdot d,$$
$$\rho \cdot S \cdot d = k \Delta t,$$

$$d - ? \quad \left| \quad d = \frac{k\Delta t}{\rho \cdot S}; \right.$$

$$d = \frac{3 \cdot 10^{-7} \cdot 2,5 \cdot 10 \cdot 7,2 \cdot 10^3}{8,9 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-1}} \text{ м}, \quad d \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ м} \approx 30 \text{ микрон.}$$

$$[d] = \left[ \frac{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3}{\text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2} \right] = \left[ \frac{\text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \right] = [\text{м}] \quad [\text{А} \cdot \text{с}] = [\text{Кл}]$$

## 8.

*Однородное электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$  создано в металле и в вакууме. Одинаковое ли расстояние пройдет за одно и то же время электрон в том и в другом случае? Начальная скорость его равна нулю.*

### Ответ:

Электроны в металле и в вакууме несомненно пройдут различные расстояния. Это связано с тем, что в вакууме электрон движется с ускорением под действием только электрического поля. В отличие от металла где на него помимо электрического поля действуют силы сопротивления кристаллической решетки. Следовательно, в металле электрон пройдет меньшее расстояние.

## 9.

*Определите скорость электронов при выходе из электронной пушки при разности потенциалов между анодом и катодом 500 и 5000 В.*

### Дано:

$$\begin{aligned} U_1 &= 500 \text{ В} = 5 \cdot 10^2 \text{ В} \\ U_2 &= 5000 \text{ В} = 5 \cdot 10^3 \text{ В} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ m &= 9 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \\ U_0 &= 0 \end{aligned}$$

### Решение:

Работа, совершенная электрическим полем, равна  $A = eU$ .

По теореме о кинетической энергии:

$$A = \frac{m_e v^2}{2}$$

$$\begin{aligned}
 & v_{1,2} - ? \quad \left| \quad eU = \frac{m_e v^2}{2} \right. \\
 & v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}; \quad v_1 = \sqrt{\frac{2eU_1}{m_e}}; \quad v_2 = \sqrt{\frac{2eU_2}{m_e}}; \\
 & v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^2}{9 \cdot 10^{-31}}} \text{ M/c}, \quad v_1 \approx 1,33 \cdot 10^7 \text{ M/c} \\
 & v_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^3}{9 \cdot 10^{-31}}} \text{ M/c}, \quad v_2 \approx 4,19 \cdot 10^7 \text{ M/c}
 \end{aligned}$$

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## Лабораторная работа № 1.

### «Опытная проверка закона Гей-Люссака»

*Цель работы: Экспериментальным путем проверить верность закона Гей-Люссака*

*Для газа данной массы отношение объема к температуре постоянно, если давление газа не меняется.*

$\frac{V}{T} = const$  при  $p = const$ . Следовательно, объем газа линейно

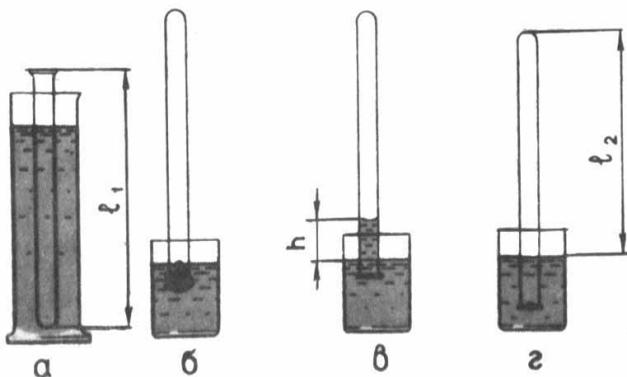
зависит от температуры при постоянном давлении:  $V = const \cdot T$ .

Чтобы проверить закон Гей-Люссака, необходимо измерить объем и температуру газа в двух состояниях при постоянном давлении и проверить верность равенства:  $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ . Это можно

осуществить, используя воздух при атмосферном давлении. Первое состояние: стеклянная трубка открытым концом вверх помещается на 3-5 мин в цилиндрический сосуд с горячей водой (рис. а). В этом случае объем воздуха  $V_1$  равен объему стеклянной трубки, а температура – температуре горячей воды  $T_1$ . Чтобы при переходе воздуха в следующее состояние его количество не изменилось, открытый конец стеклянной трубки, находящейся в горячей воде, замазывают пластилином. После следует вынуть трубку из сосуда с горячей водой и замазанный конец быстро опускают в стакан с водой комнатной температуры (рис. б). Затем прямо под водой снимают пластилин. По мере охлаждения воздуха в трубке вода в ней будет подниматься. После прекращения подъема воды в трубке (рис. в) объем воздуха будет  $V_2 < V_1$  давление  $p = p_{\text{атм.}} - \rho gh$ . Чтобы давление воздуха стало равным атмосферному надо погружать трубку в стакан до тех пор, пока уровень воды в трубке и стакане не выровняются (рис. г). Это второе состояние при  $T_2$

окружающего воздуха. Отношение объемов  $\left( \frac{V_1}{V_2} \right)$  необходимо заменить отношением высот воздушных столбов в трубке, если

сечение постоянно по всей длине  $\left( \frac{V_1}{V_2} = \frac{Sl_1}{Sl_2} = \frac{l_1}{l_2} \right)$  В работе следует сравнить  $\frac{l_1}{l_2}$  и  $\frac{T_1}{T_2}$ . Необходимые инструменты для измерения: линейка, термометр.



Пример выполнения:

Измерено					Вычислено												
$l_1$	$l_2$	$t_1$	$t_2$	$\Delta_0 l$	$\Delta_0 l$	$\Delta l$	$T_1$	$T_2$	$\Delta_0 T$	$\Delta_0 T$	$\Delta T$	$\frac{l_1}{l_2}$	$\epsilon_1$ %	$\Delta l$	$\frac{T_1}{T_2}$	$\epsilon_2$ %	$\Delta 2$
мм	мм	°C	°C	мм	мм	мм	К	К	К	К	К						
600	350	60	30	1	0,5	1,5	333	303	274	273,5	547,5	=1	0,002	0,002	=1	3,5	3,85

Используя ученическую линейку мы делаем замер длины  $l_1$  и  $l_2$ . С помощью термометра мы замеряем температуру окружающего воздуха  $T_2$ . Для дальнейшего заполнения таблицы проведем следующие вычисления:

1)  $\Delta_0 l$  – абсолютная погрешность отсчета

$$\Delta_0 l = 0,5.$$

2) Максимальная абсолютная погрешность находится по формуле:

$$\Delta l = \Delta_{\text{ин}} l + \Delta_0 l = 1 + 0,5 = 1,5.$$

$$3) T_1 = 273 + t_1 = 273 + 60 = 333.$$

$$T_2 = 273 + t_2 = 273 + 30 = 303.$$

$$\Delta_u T = 274$$

$$\Delta_o T = 273,5$$

$$\Delta T = 547,7$$

$$4) \frac{l_1}{l_2} \approx 1$$

$$\text{Относительная погрешность } \varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2} = 0,002\%$$

$$\Delta_1 = \frac{l_1}{l_2} \cdot \varepsilon_1 = 0,002$$

$$5) \frac{T_1}{T_2} \approx 1$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2} \approx \frac{547,5}{333} + \frac{547,5}{303} \approx 3,5\%$$

$$\Delta_2 = \frac{T_1}{T_2} \cdot \varepsilon_2 = \frac{333}{303} \cdot 3,5 \approx 3,85$$

Вывод: Исходя из проведенных выше опытов становится ясно, что закон Гей-Люссака, выраженный равенством в данном случае

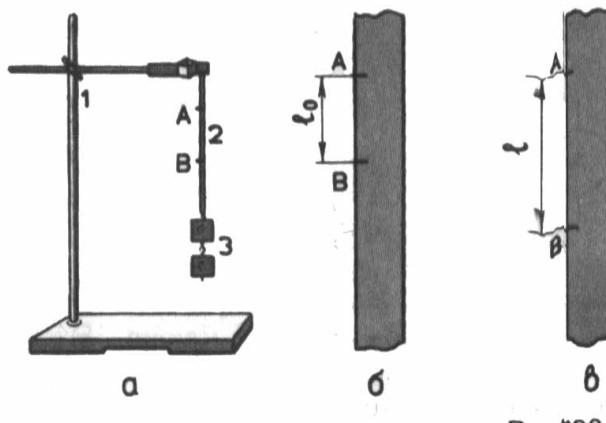
$\frac{l_1}{l_2} = \frac{T_1}{T_2}$  является верным. Что мы и доказали этой лабораторной работой.

## Лабораторная работа № 2

### «Измерение модуля упругости (модуля Юнга) резины»

Цель работы: научиться находить модуль упругости резины.

Установка для измерения модуля Юнга резины показана на рисунке а.



Модуль Юнга вычисляется по формуле полученной из закона Гука:  $E = \frac{Fl_0}{S(l-l_0)}$ , где  $E$  – модуль Юнга;  $F$  – сила упругости,

возникающая в растянутом шнуре и равная весу прикрепленных к шнуру грузов;  $S$  – площадь поперечного сечения деформированного шнура;  $l_0$  – расстояние между метками А и В на растянутом шнуре (рис. б);  $l$  – расстояние между этими же метками на растянутом шнуре (рис. в). Если поперечное сечение имеет форму круга, то площадь сечения выражается через диаметр

шнура:  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ .

Окончательная формула для определения модуля Юнга имеет вид:  $E_{np} = \frac{4Fl_0}{\pi D^2(l-l_0)}$ .

Пример выполнения:

Измерено					Вычислено										
$l_0$	$l$	$D$	$F$	$\Delta_u l$	$\Delta_0 l$	$\Delta l$	$\Delta_u D$	$\Delta_0 D$	$\Delta D$	$\frac{\Delta_u F}{F}$	$\Delta_0 F$	$\Delta F$	$\varepsilon$	$\Delta E$	
м	м	м	Н	м	м	м	м	м	м	Н	Н	Па	%	Па	
5	12	2	4	0,001	0,0005	0,0015	0,00005	0,00005	0,0001	0,05	0,05	0,1	=0,9	0,0254	0,023

Вес грузов определяется динамометром, диаметр шнура – штангенциркулем, расстояние между метками А и В – линейкой. Для заполнения таблицы проведем следующие вычисления:

1)  $\Delta_u l$  – абсолютная инструментальная погрешность

$$\Delta_u l = 0,001$$

$\Delta_0 l$  – абсолютная погрешность отсчета

$$\Delta_0 l = 0,0005$$

$\Delta l$  – максимальная абсолютная погрешность

$$\Delta l = \Delta_u l + \Delta_0 l = 0,0015$$

2)  $\Delta_u D = 0,00005$

$$\Delta_0 D = 0,00005$$

$$\Delta D = \Delta_u D + \Delta_0 D = 0,0001$$

3)  $\Delta_u F = 0,05$

$$\Delta_0 F = 0,05$$

$$\Delta F = \Delta_u F + \Delta_0 F = 0,05 + 0,05 = 0,1$$

$$4) E_{np} = \frac{4Fl_0}{\pi D^2(l-l_0)} = \frac{4 \cdot 4 \cdot 5}{\pi \cdot 2^2(12-5)} = \frac{80}{28 \cdot 3,14} \approx 0,9$$

$\varepsilon$  – относительная погрешность измерения модуля Юнга

$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta l_0}{l} + 2 \frac{\Delta D}{D} + 2 \frac{\Delta l}{l-l_0} = \frac{0,1}{4} + \frac{0,0005}{12} + 2 \frac{0,0001}{2} + 2 \frac{0,0015}{12-5} = 0,02554$$

$\Delta E$  – абсолютная погрешность измерения модуля Юнга

$$\Delta \ddot{A} = E_{np} \cdot \varepsilon = 0,9 \cdot 0,02554 = 0,023$$

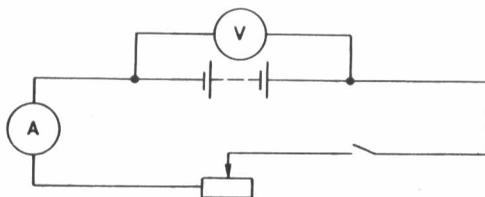
**Вывод:** полученный результат модуля упругости резины совпадает с табличным.

### Лабораторная работа № 3

#### «Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока»

Цель работы: научиться определять ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

Схема электрической цепи, которой пользуются в этой работе, показана на рисунке.



При разомкнутом ключе ЭДС источника тока равна напряжению на внешней цепи. В эксперименте источник тока замкнут на вольтметр, сопротивление которого должно быть больше внутреннего сопротивления источника тока  $r$ . Обычно сопротивление источника мало, поэтому для измерения напряжения можно использовать школьный вольтметр со шкалой 0-6 В и сопротивлением  $R_v = 900$  Ом. Так как сопротивление источника обычно мало, то действительно  $R_v \gg r$ . При этом отличие  $E$  от  $U$  не превышает десятых долей процента, поэтому погрешность измерения ЭДС равна погрешности измерения напряжения.

Внутреннее сопротивление источника тока можно измерить косвенно, сняв показания амперметра и вольтметра при замкнутом ключе. Действительно, из закона Ома для замкнутой цепи получаем  $E = U + Ir$ , где  $U = IR$  – напряжение на внешней цепи. Поэтому  $r_{np} = \frac{E_{np} - U_{np}}{I_{np}}$ . Для измерения силы тока в цепи можно использовать школьный амперметр со шкалой 0-2 А.

**Пример выполнения:**

№ опыта	Из мерено			Вычислено											
	$U_{np}$	$r_{np}$	$E_{np}$	$\Delta_0 U$	$\Delta_0 U$	$\Delta U$	$\varepsilon_U$	$\varepsilon_E$	$r_{np}$	$\Delta_0 I$	$\Delta_0 I$	$\Delta I$	$\varepsilon_I$	$\varepsilon_r$	$\Delta r$
	В	А	В	В	В	В	%	%	Ом	А	А	А	%	%	Ом
Измере- ние Е	0,05	2	1	0,1	0,05	0,15	0,03	0,5	0,475	0,1	0,05	0,15	0,075	2,335	1,1
Измере- ние r	0,05	2	1	0,1	0,05	0,15	0,03	0,5	0,475	0,1	0,05	0,15	0,075	2,335	1,1

Вставим в таблицу значения, вычисленные по формулам:

1)  $\Delta_u U$  – абсолютная инструментальная погрешность,

$$\Delta_u U = 0,1$$

$\Delta_0 U$  – абсолютная погрешность отсчета,

$$\Delta_0 U = 0,05$$

$\Delta U$  – максимальная абсолютная погрешность

$$\Delta U = \Delta_u U + \Delta_0 U = 0,1 + 0,05 = 0,15$$

2)  $\Delta_u I = 0,1$

$$\Delta_0 I = 0,05$$

$$\Delta I = \Delta_u I + \Delta_0 I = 0,1 + 0,05 = 0,15$$

$$3) r_{np} = \frac{E_{np} - U_{np}}{I_{np}} = \frac{1 - 0,05}{2} = 0,475.$$

$$4) \varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U_{np}} = \frac{0,15}{0,05} = 0,03, \quad \varepsilon_E = \frac{\Delta E}{E} = \frac{2}{1} = 0,5$$

$$5) \varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I_{np}} = \frac{0,15}{2} = 0,075,$$

$$\varepsilon_r = \frac{E \Delta + \Delta U}{E_{np} - U_{np}} + \frac{\Delta I}{I_{np}} = \frac{2 + 0,15}{1 - 0,05} + \frac{0,15}{2} = 2,335$$

$$6) \Delta r = r_{np} \cdot \varepsilon_r = 0,475 \cdot 2,335 \approx 1,1.$$

**Вывод:**

Были получены результаты измерений, в ходе эксперимента работы с приборами для определения ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.

## Лабораторная работа № 4

### «Измерение удельного сопротивления проводника»

*Цель работы: научиться вычислять удельное сопротивление проводника*

Для выполнения работы необходима проволока из материала с большим удельным сопротивлением. Сопротивление – основная электрическая характеристика проводника. Сопротивление зависит от материала проводника и его геометрии. Сопротивление длиной  $l$  и с постоянной площадью поперечного сечения  $S$  равно:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ где } S = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ тогда формула получит вид } \rho = \frac{\pi R d^2}{4l},$$

где  $d$  – диаметр проводника.

Сопротивление проводника можно измерить, используя закон Ома. В этом случае формула для расчета будет иметь вид:

$$\rho = \frac{\pi U d^2}{4 I l}.$$

*Пример вычисления*

<i>Измерено</i>				<b>Вычислено</b>																		
$l$	$d$	$I$	$U$	$\Delta_l$	$\Delta_d$	$\Delta_I$	$\epsilon_I$	$\Delta_U$	$\Delta_{Ud}$	$\Delta_d$	$\Delta_{d^2}$	$\epsilon_{d^2}$	$\Delta_{Ud^2}$	$\Delta_I$	$\epsilon_I$	$\Delta_{\rho}$	$\Delta_{\rho U}$	$\Delta U$	$\epsilon_U$	$R_{np}$	$\Delta R$	$\epsilon_R$
м	м	А	В	м	м	м	%	м	м	м	м	%	А	А	%	В	В	В	%	Ом·м	Ом·м	%
0,5	0,02	2	1,5	0,001	0,0005	0,0015	0,3	0,00005	0,00005	0,0001	0,5	0,105	0,05	0,1	5	0,015	0,1	0,25	17	0,00065	0,001365	0,0013

$$1) \Delta_u l = 0,001 \text{ M}$$

$$\Delta_0 l = 0,0005$$

$$\Delta l = \Delta_u l + \Delta_0 l = 0,001 + 0,0005 = 0,0015.$$

$$\dot{\alpha}_l = \frac{\ddot{\Delta} l}{l} = \frac{0,0015}{0,5} = 0,3$$

$$2) \Delta_u d = 0,0005$$

$$\Delta_0 d = 0,0005$$

$$\Delta d = \Delta_u d + \Delta_0 d = 0,00005 + 0,00005 = 0,0001$$

$$\dot{\alpha}_d = \frac{\Delta d}{d} = 0,5$$

$$3) \Delta_u I = 0,05$$

$$\Delta_0 I = 0,05$$

$$\Delta I = \Delta_u I + \Delta_0 I = 0,05 + 0,05 = 0,1$$

$$\dot{\alpha}_I = \frac{\ddot{\Delta} I}{I} = 5.$$

$$4) \Delta_u U = 0,15$$

$$\Delta_0 U = 0,1$$

$$\Delta U = \Delta_u U + \Delta_0 U = 0,25$$

$$\dot{\alpha}_U = \frac{\ddot{\Delta} U}{U} = 17$$

$$5) \rho_{np} = \frac{\delta R d^2}{4l} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2 \cdot 0,1}{4 \cdot 0,5} = 0,000065$$

$$\varepsilon \rho = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + 2 \frac{\Delta d}{d} + 2 \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,25}{1,5} + \frac{0,1}{2} + 2 \frac{0,0015}{0,5} = 0,0013$$

$$\Delta \rho = \rho_{np} + \varepsilon \rho = 0,000065 + 0,0013 = 0,001365.$$

## Лабораторная работа № 5

### «Изучение последовательного и параллельного соединения проводов»

*Цель работы: проверить следующие законы:*

1) для последовательного соединения проводников:

$$U = U_1 + U_2, \quad R = R_1 + R_2, \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

2) для параллельного соединения проводников:

$$I = I_1 + I_2, \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

*Соберем цепь для изучения последовательного соединения резисторов. Измерим напряжение на концах рассматриваемого участка и на каждом из проводников, тогда общее напряжение будет равно сумме напряжений на каждом проводнике:  $U = U_1 + U_2$ , а значение резистора будет равно сумме значения каждого резистора:  $R = R_1 + R_2$  и отношение  $\frac{U_1}{U_2}$  будет равно*

*отношению  $\frac{R_1}{R_2}$ .*

*Соберем цепь для изучения параллельного соединения резисторов. Измерим силу тока в цепи. Общее значение силы тока равно сумме значения силы тока на разветвленных проводах. Величина, обратная резистору всего участка цепи, равна сумме величин, обратных резисторам проводников:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ . И*

*значение отношения  $\frac{I_1}{I_2}$  равно обратному отношению резисторов*

*$\frac{R_2}{R_1}$ .*

Пример вычисления:

Измерено						Вычислено								
U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	U	R	T	ε <sub>U</sub>	ε <sub>R</sub>	ε <sub>I</sub>	ΔU	ΔR	ΔI
В	В	А	А	Ом	Ом	В	Ом	А	%	%	%	В	Ом	А
1	2	0,5	1	0,1	0,2	3	0,3	1,5	-	-	-	-	-	-

Для заполнения таблицы используем следующие формулы:  
расчет погрешностей можно не производить.

$$1) U = U_1 + U_2 = 1 + 2 = 3$$

$$\varepsilon_U = \frac{\Delta U_1 + \Delta U_2}{U_1 + U_2} =$$

$$\Delta U_1 = \Delta_u U_1 + \Delta_0 U_1 =$$

$$\Delta U_2 = \Delta_u U_2 + \Delta_0 U_2 =$$

$$\Delta U = U \cdot \varepsilon_U =$$

$$2) I = I_1 + I_2 = 0,5 + 1 = 1,5$$

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I_1 + \Delta I_2}{I_1 + I_2} =$$

$$\Delta I_1 = \Delta_u I_1 + \Delta_0 I_1 =$$

$$\Delta I_2 = \Delta_u I_2 + \Delta_0 I_2 =$$

$$\Delta I = I \cdot \varepsilon_I =$$

3)  $R = R_1 + R_2 = 0,1 + 0,2 = 0,3$  для последовательного соединения проводников.

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R_1 + \Delta R_2}{R_1 + R_2} =$$

$$\Delta R_1 = \Delta_u R_1 + \Delta_0 R_1 =$$

$$\Delta R_2 = \Delta_u R_2 + \Delta_0 R_2 =$$

$$\Delta R = R \cdot \varepsilon_R =$$

4)  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$  для параллельного соединения проводников

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} =$$

$$\varepsilon_R = \frac{\Delta R_1 \cdot \Delta R_2}{R_1 \cdot R_2} + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} =$$

$$\Delta R_1 = \Delta_u R_1 + \Delta_0 R_1 =$$

$$\Delta R_2 = \Delta_u R_2 + \Delta_0 R_2 =$$

$$\Delta R = R \varepsilon_R =$$

**Вывод:** законы верны и доказаны в ходе эксперимента опытным путем для последовательного и параллельного соединения проводников.

## Лабораторная работа № 6

### «Наблюдение действия магнитного поля на ток»

Цель работы: проверить экспериментальным путем воздействия магнита на движение тока

*Согласно теории близкого действия ток в одном из проводников не может непосредственно действовать на ток в другом проводнике.*

Электрический ток в одном из проводников создает вокруг себя магнитное поле, которое действует на ток во втором проводнике. А поле, созданное электрическим током второго проводника, действует на первый.

Поднесем к висящему мотку 1 магнит 2 и, замыкая ключ 3 пронаблюдаем за движением мотка. Мы видим, что моток встал прямо и неподвижно. Если мы поменяем полярность магнита, то ток и моток поменяют свои направления.

**Вывод:** экспериментальным путем доказали, что магнитное поле воздействует на ток и определяет его направление.

## Лабораторная работа № 7

### «Определение заряда электрона»

Цель работы: научиться определять заряд электрона экспериментальным путем.

*Схема измерительной установки показана на рисунке.*

Для проведения эксперимента можно использовать водный раствор сульфата меди ( $\text{CuSO}_4$ ), а в качестве электродов – медные пластины.

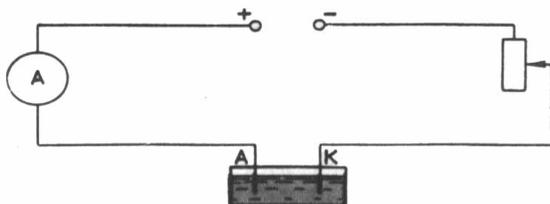
Заряд электрона может быть определен по формуле:

$$e = \frac{M}{mnN_A} It ,$$

полученной из закона Фарадея для электролиза. Здесь  $m$  – масса выделившегося на электроде вещества,  $M$  – молярная масса вещества,  $n$  – валентность этого вещества,  $N_A$  – постоянная Авогадро,  $I$  – сила тока, прошедшего через раствор электролита,  $t$  – время прохождения тока. Масса выделившейся на катоде меди определяется путем взвешивания катода до и после проведения опыта. Поэтому  $m = m_2 + m_1$ , и формула для определения заряда электрона примет вид:

$$e_{np} = \frac{M}{(m_2 - m_1)nN_A} It .$$

Для измерения силы тока используют школьный амперметр, время измеряется часами. Реостат в цепи необходим для регулирования силы тока.



*Пример выполнения*

Измерено			Вычислено											
m	t	I	$\Delta_m$	$\Delta_0$	$\Delta m$	$\Delta_{nt}$	$\Delta_0 t$	$\Delta t$	$\Delta_n I$	$\Delta_0 I$	$\Delta I$	$e_{np}$	$\Delta e$	$\varepsilon_e$
кг	с	А	кг	кг	кг	с	с	с	А	А	А	Кл	Кл	%
0,2	30	1	0,0001	0,000005	0,000015	1	0,5	1,5	0,05	0,025	0,075	8,3	1,0375	0,125

*Используем следующие формулы для заполнения таблицы:*

1)  $\Delta_m$  – абсолютная погрешность

$$\Delta_m = 0,00001 \text{ кг}$$

$\Delta_0$  – абсолютная погрешность отсчета

$$\Delta_0 = 0,000005 \text{ кг}$$

$\Delta m$  – максимальная абсолютная погрешность

$$\Delta m = \Delta_m + \Delta_0 = 0,00001 + 0,000005 = 0,000015 \text{ кг}$$

2)  $\Delta_{nt} = 1$

$$\Delta_0 t = 0,5$$

$$\Delta t = \Delta_{nt} + \Delta_0 t = 1 + 0,5 = 1,5$$

3)  $\Delta_n I = 0,05$

$$\Delta_0 I = 0,025$$

$$\Delta I = \Delta_n I + \Delta_0 I = 0,05 + 0,025 = 0,075$$

$$4) e_{np} = \frac{M}{(m_2 - m_1)nN_A} \cdot I \cdot t = \frac{160}{(1 - 0,2) \cdot 4 \cdot 6,02} \approx 8,3$$

$$\varepsilon_e = \frac{2\Delta m}{m_2 - m_1} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t} = \frac{2 \cdot 0,000015}{(1 - 0,2)} + \frac{0,075}{1} + \frac{1,5}{30} = 0,125$$

$$\Delta e = e_{np} \cdot \varepsilon_e = 8,3 \cdot 0,125 \approx 1,0375$$

**Вывод:** на опыте с помощью приборов и инструментов удалось экспериментально вычислить заряд электрона.

## СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### Плотности некоторых твердых тел

Твердое тело	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Твердое тело	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
Осмий	22600	22,6	Мрамор	2700	2,7
Иридий	22400	22,4	Стекло		
Платина	21500	21,5	оконное	2500	2,5
Золото	19300	19,3	Фарфор	2300	2,3
Свинец	11300	11,3	Бетон	2300	2,3
Серебро	10500	10,5	Кирпич	1800	1,8
Медь	8900	8,9	Сахар-		
Латунь	8500	8,5	рафинад	1600	1,6
Сталь,			Оргстекло	1200	1,2
железо	7800	7,8	Капрон	1100	1,1
Олово	7300	7,3	Полиэтилен	920	0,92
Цинк	7100	7,1	Парафин	900	0,90
Чугун	7000	7,0	Лед	900	0,90
Корунд	4000	4,0	Дуб (сухой)	700	0,70
Алюминий	2700	2,7	Сосна (сухая)	400	0,40
			Пробка	240	0,24

### Плотности некоторых жидкостей

Жидкость	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Жидкость	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
Ртуть	13600	13,60	Керосин	800	0,80
Серная			Спирт	800	0,80
кислота	1800	1,80	Нефть	800	0,80
Мед	1350	1,35	Ацетон	790	0,79
Вода морская	1030	1,03	Эфир	710	0,71
Молоко			Бензин	710	0,71
цельное	1030	1,03	Жидкое		
Вода чистая	1000	1,00	олово (при t		
Масло			= 400 °С)	6800	6,80
подсолнечное	930	0,93	Жидкий		
Масло			воздух (при t		
машинное	900	0,90	= -194 °С)	860	0,86

## Плотности некоторых газов

Газ	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	Газ	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\rho, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$
Хлор	3,210	0,00320	Оксид углерода (II) (угарный газ)	1,250	0,00125
Оксид углерода (IV) (углекислый газ)	1,980	0,00198	Природный газ	0,800	0,0008
Кислород	1,430	0,00143	Водяной пар (при $t = 100^\circ\text{C}$ )	0,590	0,00059
Воздух (при $0^\circ\text{C}$ )	1,290	0,00129	Гелий	0,180	0,00018
Азот	1,250	0,00125	Водород	0,090	0,00009

## Основные физические постоянные

Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Гравитационная постоянная	$G = 6,67 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{м}^3)$
Число Авогадро	$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Элементарный заряд	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$
Постоянная Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$