

# Основы электродинамики

## 1. Электрическое поле. Закон Кулона

1.1. Два тела, имеющие равные отрицательные электрические заряды, отталкиваются в воздухе ( $\epsilon = 1$ ) с силой 0,9 Н. Определить число избыточных электронов в каждом теле, если расстояние между зарядами 8 см.

**Дано:**

$$\epsilon = 1,$$

$$Q_1 = Q_2 = Q,$$

$$F = 0,9 \text{ Н},$$

$$r = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м},$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2),$$

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

**Найти**

$N$ .

**Решение.**

В каждом теле, имеющем заряд  $Q$ , содержится

$N = \frac{Q}{e}$  электронов. Из за-

кона Кулона  $F = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$

находим

$$Q = \sqrt{4\pi\epsilon_0 r^2 F}; N = \frac{\sqrt{4\pi\epsilon_0 r^2 F}}{e};$$

$$N = \frac{\sqrt{\frac{4\pi}{36\pi \cdot 10^9} \text{ Кл} / (\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot 64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot 0,9 \text{ Н}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 5 \cdot 10^{12}.$$

**Ответ:**  $N = 5 \cdot 10^{12}$ .

1.2. Два заряда по  $4 \cdot 10^{-8}$  Кл, разделенные слюдой толщиной 1 см, взаимодействуют с силой  $1,8 \cdot 10^{-2}$  Н. Определить диэлектрическую проницаемость слюды.

**Дано:**

$$Q_1 = Q_2 = Q =$$

$$= 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл},$$

$$r = 10^{-2} \text{ м},$$

$$F = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ Н}.$$

**Найти**

$\epsilon$ .

$$\epsilon = \frac{9 \cdot 10^9 Q^2}{F r^2}, \epsilon = \frac{9 \cdot 10^9 (\overset{\sim}{1} \cdot \overset{\sim}{1}^2) / \overset{\sim}{\epsilon} \overset{\sim}{\epsilon}^2 \cdot 16 \cdot 10^{-16} \overset{\sim}{\epsilon} \overset{\sim}{\epsilon}^2}{1,8 \cdot 10^{-2} \overset{\sim}{1} \cdot 10^{-4} \overset{\sim}{1}^2} = 8.$$

**Ответ:**  $\epsilon = 8$ .

**Решение.**

Запишем формулу закона Кулона в таком виде:

$$F = \frac{9 \cdot 10^9 Q_1 Q_2}{\epsilon r^2}.$$

Так как  $Q_1 = Q_2 = Q$ , то

1.3. Два электрических заряда притягиваются друг к другу в керосине с силой 7,8 Н. С какой силой они будут притягиваться, если их поместить в глицерин на расстояние, в два раза меньшее, чем в керосине? Диэлектрическая проницаемость керосина равна 2, глицерина 39.

**Дано:**

$$F_{\text{к}} = 7,8 \text{ Н},$$

$$r_{\text{к}} = 2r_{\text{г}},$$

$$\epsilon_{\text{к}} = 2,$$

$$\epsilon_{\text{г}} = 39.$$

**Найти**

$$F_{\text{г}}.$$

**Решение.**

По закону Кулона сила, с которой притягиваются два заряда в ке-

росине, равна  $F_{\text{к}} = \frac{9 \cdot 10^9 Q_1 Q_2}{\epsilon_{\text{к}} r_{\text{к}}^2}$ ; в гли-

церине  $F_{\text{г}} = \frac{9 \cdot 10^9 Q_1 Q_2}{\epsilon_{\text{г}} r_{\text{г}}^2}$ .

Согласно условию задачи

$$\frac{F_{\text{к}}}{F_{\text{г}}} = \frac{\epsilon_{\text{г}} r_{\text{г}}^2}{\epsilon_{\text{к}} r_{\text{к}}^2} = \frac{\epsilon_{\text{г}} r_{\text{г}}^2}{\epsilon_{\text{к}} 4r_{\text{г}}^2} = \frac{\epsilon_{\text{г}}}{4\epsilon_{\text{к}}}.$$

Отсюда находим

$$F_{\text{г}} = \frac{F_{\text{к}} \cdot 4\epsilon_{\text{к}}}{\epsilon_{\text{г}}}, \quad F_{\text{г}} = \frac{7,8 \text{ Н} \cdot 8}{39} = 1,6 \text{ Н}.$$

**Ответ:**  $F_{\text{г}} = 1,6 \text{ Н}$ .

## 2. Напряженность и потенциал электрического поля

2.1. Металлическому шару радиусом 30 см сообщен заряд 6 нКл. Определить напряженность электрического поля на поверхности шара.

**Дано:**

$$r = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м},$$

$$Q = 6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл},$$

$$\epsilon = 1.$$

**Найти**

$$E.$$

**Решение.**

Напряженность поля заряженной сферической поверхности

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 Q}{\epsilon r^2};$$

$$E = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot 6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{\text{Кл}^2 \cdot 9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2} = 600 \text{ Н/Кл}.$$

**Ответ:**  $E = 600 \text{ Н/Кл}$ .

•  $+Q$



Рис. 8

**2.2.** Между двумя разноименно заряженными металлическими шарами помещен свободно перемещающийся пробный положительный заряд  $Q$ , как показано на рис. 8. Изобразить схематически линию напряженности электрического поля, проходящую через точку, в которой находится пробный заряд, и объяснить, почему она имеет такую конфигурацию.

напряженности электрического поля, проходящую через точку, в которой находится пробный заряд, и объяснить, почему она имеет такую конфигурацию.

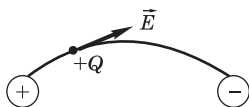


Рис. 9

**Решение.**  
Линия напряженности электрического поля показана на рис. 9. Она представляет собой кривую, касательная в каждой точке которой совпадает с направлением вектора напряженности, а его направление зависит от направления векторов напряженности суммарного электрического поля данных зарядов.

висит от направления векторов напряженности суммарного электрического поля данных зарядов.

**Ответ:** рис. 9.

**2.3.** В некоторой точке поля на заряд  $10^{-7}$  Кл действует сила  $4 \cdot 10^{-3}$  Н. Найти напряженность поля в этой точке и определить заряд, создающий поле, если точка удалена от него на 0,3 м.

**Дано:**

$$Q_1 = 10^{-7} \text{ Кл},$$

$$F_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Н},$$

$$r = 3 \cdot 10^{-1} \text{ м},$$

$$\epsilon = 1.$$

**Найти:**

$$E_1; Q.$$

**Решение.**

Согласно определению напряженности электрического поля

$$E_1 = \frac{F_1}{Q_1};$$

$$E_1 = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ Н}}{10^{-7} \text{ Кл}} = 4 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл}.$$

Напряженность поля, созданного точечным зарядом  $Q$ , равна

$$E_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2},$$

откуда  $Q = 4\pi\epsilon_0\epsilon r^2 E_1$ . Вычисляя, находим

$$Q = \frac{9 \cdot 10^{-2} \hat{i}^2 \cdot 4 \cdot 10^4 \frac{\hat{i}}{\hat{E}\hat{e}} \cdot \hat{E}\hat{e}^2}{9 \cdot 10^9 \hat{i} \cdot \hat{i}^2} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл.}$$

**Ответ:**  $E_1 = 4 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл}$ ;  $Q = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ .

**2.4.** В однородном электрическом поле электрон движется с ускорением  $a = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ м/с}^2$ . Определить напряженность поля. Масса электрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .

**Дано:**

$$a = 3,2 \cdot 10^{13} \text{ м/с}^2,$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг},$$

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

**Найти**

$E$ .

**Решение.**

На электрон действует кулоновская сила  $F = eE$  и сообщает ускорение  $a$ . По второму закону Ньютона,

$$F = ma, \text{ или } eE = ma.$$

Отсюда находим напряженность электрического поля

$$E = \frac{ma}{e}; E = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 3,2 \cdot 10^{13} \text{ м/с}^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 182 \text{ Н/Кл.}$$

**Ответ:**  $E = 182 \text{ Н/Кл}$ .

**2.5.** Два заряда  $6 \cdot 10^{-7}$  и  $-2 \cdot 10^{-7}$  Кл расположены в керосине на расстоянии 0,4 м друг от друга. Определить напряженность поля в точке  $O$ , расположенной на середине отрезка прямой, соединяющего центры зарядов.

**Дано:**

$$Q_1 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ Кл},$$

$$Q_2 = -2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл},$$

$$r = r_1 = r_2 = 2 \cdot 10^{-1} \text{ м},$$

$$\epsilon = 2.$$

**Найти**

$E$ .

**Решение.**

Согласно принципу суперпозиции электрических полей, имеем  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ .

Так как векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  направлены по одной прямой

и в одну сторону, то напряженность поля в точке  $O$

будет равна сумме модулей напряженностей  $|\vec{E}_1|$  и  $|\vec{E}_2|$ :

$$E = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \frac{9 \cdot 10^9 (Q_1 + Q_2)}{\epsilon r^2},$$

$$E = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 8 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} \text{ Н/Кл} = 9 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл.}$$

**Ответ:**  $E = 9 \cdot 10^4 \text{ Н/Кл.}$

**2.6.** Какую скорость приобретет в электрическом поле электрон, находящийся в состоянии покоя, если ускоряющая разность потенциалов 1000 В? Масса электрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$

**Дано:**

$$U = 10^3 \text{ В,}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг,}$$

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

**Найти**

$v.$

**Решение.**

Электрон, двигаясь в электрическом поле, приобретает кинетическую энергию  $W_{\text{к}} = mv^2/2$ . Работа сил электрического поля по перемещению заряда (электрона) равна

$A = eU$ . По закону сохранения энергии  $A = W_{\text{к}}$ , или  $eU = mv^2/2$ . Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}; v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 10^3 \text{ В}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 1,86 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$$

**Ответ:**  $v = 1,86 \cdot 10^7 \text{ м/с.}$

**2.7.** Между двумя горизонтально расположенными пластинами, заряженными до 10 кВ, удерживается в равновесии пылинка массой  $2 \cdot 10^{-10} \text{ кг}$ . Определить заряд пылинки, если расстояние между пластинами 5 см.

**Дано:**

$$U = 10^4 \text{ В,}$$

$$m = 2 \cdot 10^{-10} \text{ кг,}$$

$$d = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м,}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

**Найти**

$Q.$

**Решение.**

Пылинка удерживается в равновесии, когда ее сила тяжести  $mg$  будет равна удерживающей кулоновской силе  $F_{\text{к}}$ , т. е.  $F_{\text{к}} = mg$ . Сила

$$F_{\text{к}} = QE = \frac{QU}{d},$$

так как  $E = \frac{U}{d}$ . Следовательно,

$$Q \frac{U}{d} = mg,$$

откуда

$$Q = \frac{mgd}{U},$$

$$Q = \frac{2 \cdot 10^{-10} \text{ кг} \cdot 9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{10^4 \text{ В}} = 9,8 \cdot 10^{-15} \text{ Кл.}$$

**Ответ:**  $Q = 9,8 \cdot 10^{-15} \text{ Кл.}$

**2.8.** Электрический потенциал на поверхности шара равен 120 В. Чему равны напряженность и потенциал внутри этого шара?

**Дано:**

$$\varphi_{\text{ш}} = 120 \text{ В.}$$

**Найти**

$$E_{\text{вн}}; \varphi_{\text{вн}}.$$

**Решение.**

Так как электрическое поле внутри заряженного проводника отсутствует, то напряженность поля внутри него равна нулю. Электрические заряды на поверхности шара находятся в статическом, равновесном состоянии, т. е. разность потенциалов в любых двух точках, взятых на поверхности шара или внутри него, равна нулю, т. е. потенциалы всех точек проводника равны между собой. Следовательно, потенциал внутри металлического шара равен 120 В.

**Ответ:**  $E_{\text{вн}} = 0$ ;  $\varphi_{\text{вн}} = 120 \text{ В.}$

**2.9.** Металлическому шару радиусом 0,1 м сообщен заряд  $-5 \text{ нКл}$ . Определить напряженность и потенциал электрического поля в центре шара.

**Дано:**

$$r = 10^{-1} \text{ м,}$$

$$Q = -5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл,}$$

$$\epsilon = 1.$$

**Найти:**

$$E; \varphi.$$

**Решение.**

Напряженность электрического поля в центре шара равна нулю, т. е.  $E = 0$ , так как все заряды располагаются на поверхности шара.

Потенциал в центре шара равен потенциалу электрического поля на его поверхности, так как поверхность металлического шара эквипотенциальна. Поэтому запишем

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} = \frac{9 \cdot 10^9 Q}{\epsilon r};$$

$$\varphi = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2 \cdot (-5 \cdot 10^{-9}) \text{ Кл}}{\text{Кл}^2 \cdot 10^{-1} \text{ м}} = -450 \text{ В.}$$

**Ответ:**  $E = 0$ ;  $\varphi = -450 \text{ В}$ .

### 3. Электрическая емкость. Конденсаторы

**3.1.** Обладает ли электрической емкостью незаряженный проводник?

**Решение.**

Электрическая емкость проводника зависит от его формы, размеров, площади внешней поверхности и от свойств окружающей среды, но не зависит ни от массы, ни от рода вещества, ни от заряда, т. е. незаряженный (нейтральный) проводник обладает электроемкостью.

**Ответ:** Да.

**3.2.** Плоскому конденсатору электроемкостью 500 пФ сообщен заряд  $2 \cdot 10^{-6}$  Кл. Определить энергию электрического поля конденсатора.

**Дано:**  
 $C = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$ ,  
 $Q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ .

**Найти**  
 $W$ .

**Решение.**

Энергия электрического поля заряженного конденсатора  $W = \frac{QU}{2}$ .

Согласно определению, электроемкость  $C = \frac{Q}{U}$ , откуда  $U = \frac{Q}{C}$ .

Находим:

$$W = \frac{Q^2}{2C}; W = \frac{4 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $W = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ .

**3.3.** При сообщении конденсатору заряда  $5 \cdot 10^{-6}$  Кл его энергия оказалась равной 0,01 Дж. Определить напряжение на обкладках конденсатора.

**Дано:**

$$Q = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл,}$$

$$W = 0,01 \text{ Дж.}$$

**Найти**

$U$ .

**Решение.**

Энергия электрического поля заряженного конденсатора

$$W = \frac{QU}{2},$$

отсюда напряжение на обкладках

конденсатора

$$U = \frac{2W}{Q}; U = \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}} = 4 \cdot 10^3 \text{ В} = 4 \text{ кВ.}$$

**Ответ:**  $U = 4 \text{ кВ.}$

**3.4.** Напряженность электрического поля конденсатора электроемкостью 0,8 мкФ равна 1000 В/м. Определить энергию электрического поля конденсатора, если расстояние между его обкладками равно 1 мм.

**Дано:**

$$C = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф,}$$

$$E = 10^3 \text{ В/м,}$$

$$d = 10^{-3} \text{ м.}$$

**Найти**

$W$ .

**Решение.**

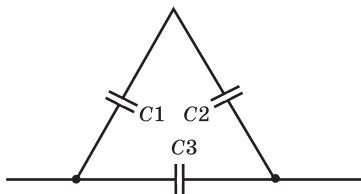
Так как энергия электрического

поля конденсатора  $W = \frac{CU^2}{2}$ , а потенциал и напряженность связаны соотношением  $U = Ed$ , получим

$$W = \frac{Cd^2E^2}{2}; W = \frac{0,8 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot 10^6 \text{ В}^2}{2 \text{ м}^2} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $W = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$

**3.5.** Определить электроемкость батареи конденсаторов, изображенной на рис. 10, если электроемкости конденсаторов одинаковы и равны 600 мкФ каждая.



**Рис. 10**



**Дано:**

$$\begin{aligned}C_1 &= C_2 = \\ &= C_3 = C = \\ &= 600 \text{ мкФ.}\end{aligned}$$

**Найти**

$C_6$ .

**Решение.**

Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  соединены последовательно, поэтому

$$C_{1-2} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Конденсаторы  $C_{1-2}$  и  $C_3$  соединены параллельно, поэтому

$$C_6 = C_{1-2} + C_3 = \frac{C^2}{2C} + C = 1,5 C;$$

$$C_6 = 600 \text{ мкФ} \cdot 1,5 = 900 \text{ мкФ}.$$

**Ответ:**  $C_6 = 900 \text{ мкФ}$ .

## 4. Постоянный электрический ток. Закон Ома для участка цепи

**4.1.** Определить скорость дрейфа электронов проводимости в медном проводнике, по которому проходит ток 5 А, если площадь его поперечного сечения 20 мм<sup>2</sup>, концентрация электронов проводимости  $n_0 = 9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ . За какое время электрон переместится по проводнику на 1 см? Электрический ток постоянный.

**Дано:**

$$\begin{aligned}I &= 5 \text{ А,} \\ S &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, \\ n_0 &= 9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}, \\ l &= 10^{-2} \text{ м,} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}\end{aligned}$$

**Найти:**

$v$ ;  $t$ .

**Решение.**

Скорость дрейфа электронов проводимости определим из формулы  $I = en_0 S v$ :

$$v = \frac{I}{en_0 S};$$

$$\begin{aligned}v &= \frac{5 \text{ А}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 9 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2} = \\ &= 1,74 \cdot 10^{-5} \text{ м/с} = 0,0174 \text{ мм/с.}\end{aligned}$$

Принимая среднюю скорость дрейфа электронов проводимости постоянной в постоянном токе, получим

$$t = \frac{l}{v}; t = \frac{10^{-2} \text{ м}}{1,74 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}} = 575 \text{ с} = 9 \text{ мин } 35 \text{ с.}$$

**Ответ:**  $v = 0,0174 \text{ мм/с}; t = 9 \text{ мин } 35 \text{ с.}$

**4.2.** Определить концентрацию электронов проводимости (число электронов в  $1 \text{ м}^3$ ) в цинке, если плотность цинка  $\rho = 7,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и его молярная масса  $M = 65,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . Число электронов проводимости равно числу атомов в металле.

**Дано:**

$$V = 1 \text{ м}^3,$$

$$\rho = 7,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

$$M = 65,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль},$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

**Найти**

$n$ .

**Решение.**

Число атомов в металле

$$n = \frac{m}{M} N_A, \text{ но } m = \rho V, \text{ поэтому}$$

$$n = \frac{\rho V N_A}{M};$$

$$n = \frac{7,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 1 \text{ м}^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{65,4 \cdot 10^{-3} \text{ моль}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль}} = 6,5 \cdot 10^{28}.$$

**Ответ:**  $n = 6,5 \cdot 10^{28}$ .

**4.3.** Является ли источник тока источником электрических зарядов в цепи? Объяснить.

**Решение.**

В источнике тока под действием сторонних сил происходит непрерывное разделение электрических зарядов, в результате чего на его полюсах поддерживается разность потенциалов. Таким образом, источник тока не создает заряды: заряды невозможно ни создать, ни уничтожить. Заряды могут только перемещаться. Источник тока можно сравнить с насосом, который, подавая жидкость по трубам на некоторую высоту, создает разность потенциальных уровней. Как насос не создает жидкость, так и источник тока не создает электрических зарядов.

**Ответ:** Нет.

**4.4.** Через лампочку накаливания течет ток 0,8 А. Сколько электронов проводимости (свободных электронов) проходит через поперечное сечение волоска лампы в 1 с?

**Дано:**

$$I = 0,8 \text{ А,}$$

$$t = 1 \text{ с,}$$

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

**Найти**

$N$ .

**Решение.**

Сила тока, по определению,

$$I = \frac{Q}{t}, \text{ откуда } Q = It. \text{ Тогда}$$

$$N = \frac{Q}{e} = \frac{It}{e};$$

$$N = \frac{0,8 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 5 \cdot 10^{18}.$$

**Ответ:**  $N = 5 \cdot 10^{18}$ .

**4.5.** Определить разность потенциалов на концах резистора сопротивлением 50 Ом, по которому идет ток 2 А. Построить вольт-амперную характеристику этого резистора.

**Дано:**

$$R = 50 \text{ Ом,}$$

$$I = 2 \text{ А.}$$

**Найти**

$$\varphi_1 - \varphi_2.$$

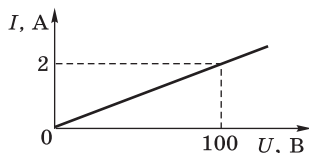
**Решение.**

Согласно закону Ома

$$\varphi_1 - \varphi_2 = IR;$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 2 \text{ А} \cdot 50 \text{ Ом} = 100 \text{ В.}$$

На рис. 11 дана вольт-амперная характеристика проводника.



**Рис. 11**

**Ответ:**  $\varphi_1 - \varphi_2 = 100 \text{ В.}$

## 5. Закон Ома для полной цепи

5.1. ЭДС источника электрической энергии равна 100 В. При внешнем сопротивлении 49 Ом сила тока в цепи 2 А. Найти падение напряжения внутри источника и его внутреннее сопротивление.

**Дано:**

$$\mathcal{E} = 100 \text{ В,}$$

$$R = 49 \text{ Ом,}$$

$$I = 2 \text{ А.}$$

**Найти:**

$$U_{\text{внутр}}; r.$$

**Решение.**

Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

откуда получим  $\mathcal{E} = IR + Ir$ , или

$$U_{\text{внутр}} = \mathcal{E} - IR;$$

$$U_{\text{внутр}} = 100 \text{ В} - 2 \text{ А} \cdot 49 \text{ Ом} = 2 \text{ В};$$

$$r = \frac{U_{\text{внутр}}}{I}; \quad r = \frac{2 \text{ В}}{2 \text{ А}} = 1 \text{ Ом.}$$

**Ответ:**  $U_{\text{внутр}} = 2 \text{ В}; r = 1 \text{ Ом.}$

5.2. Какую работу должна совершить сторонняя сила при разделении зарядов +10 и -10 Кл, чтобы ЭДС источника тока была 3,3 В?

**Дано:**

$$Q_1 = 10 \text{ Кл,}$$

$$Q_2 = -10 \text{ Кл,}$$

$$\mathcal{E} = 3,3 \text{ В.}$$

**Найти**

**A.**

**Решение.**

При разделении зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  сторонняя сила совершила работу по перемещению заряда  $|Q_1| =$

$= |Q_2| = 10 \text{ Кл}$ , потому что электроны, общий заряд которых -10 Кл,

были переброшены от положительного полюса источника тока на отрицательный. Эта работа

$$A = Q\mathcal{E}, \quad A = 10 \text{ Кл} \cdot 3,3 \text{ В} = 33 \text{ Дж.}$$

**Ответ:**  $A = 33 \text{ Дж.}$

5.3. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока, если при внешнем сопротивлении 3,9 Ом сила тока в цепи равна 0,5 А, а при внешнем сопротивлении 1,9 Ом — 1 А.

**Дано:**

$$R_1 = 3,9 \text{ Ом},$$

$$I_1 = 0,5 \text{ А},$$

$$R_2 = 1,9 \text{ Ом},$$

$$I_2 = 1 \text{ А}.$$

**Найти:**

$\mathcal{E}$ ;  $r$ .

**Решение.**

Используя закон Ома для полной цепи, составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = I_1 (R_1 + r), \\ \mathcal{E} = I_2 (R_2 + r). \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получим

$$\mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_1 - R_2)}{I_2 - I_1}; \quad r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1};$$

$$\mathcal{E} = \frac{0,5 \text{ А} \cdot 1 \text{ А} \cdot 2 \text{ Ом}}{0,5 \text{ А}} = 2 \text{ В};$$

$$r = \frac{0,5 \text{ А} \cdot 3,9 \text{ Ом} - 1 \text{ А} \cdot 1,9 \text{ Ом}}{0,5 \text{ А}} = 0,1 \text{ Ом}.$$

**Ответ:**  $\mathcal{E} = 2 \text{ В}$ ;  $r = 0,1 \text{ Ом}$ .

**5.4.** Определить силу тока при коротком замыкании батареи с ЭДС 12 В, если при замыкании ее на внешний резистор сопротивлением 4 Ом сила тока в цепи равна 2 А. Почему при коротком замыкании падение напряжения на внешнем участке цепи близко к нулю, хотя в этом случае в цепи существует наибольший ток?

**Дано:**

$$\mathcal{E} = 12 \text{ В},$$

$$R = 4 \text{ Ом},$$

$$I = 2 \text{ А}.$$

**Найти**

$I_{\text{к.з.}}$

**Решение.**

Используя закон Ома для полной цепи и учитывая, что при коротком замыкании  $R = 0$ , находим

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}; \quad r = \frac{\mathcal{E} - IR}{I};$$

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E} I}{\mathcal{E} - IR}; \quad I_{\text{к.з.}} = \frac{12 \text{ В} \cdot 2 \text{ А}}{12 \text{ В} - 2 \text{ А} \cdot 4 \text{ Ом}} = 6 \text{ А}.$$

**Ответ:**  $I_{\text{к.з.}} = 6 \text{ А}$ . При коротком замыкании  $R \rightarrow 0$ , поэтому и  $U \rightarrow 0$ , так как  $U = IR$ , и работа сил электрического поля по перемещению зарядов практически равна нулю.

**5.5.** Разность потенциалов на клеммах разомкнутого источника тока 24 В. При включении внешней цепи разность потенциалов на клеммах источника тока стала равной 22 В, а сила тока 4 А. Определить внутреннее сопротивление источника тока, сопротивление внешнего участка цепи и полное сопротивление цепи.

**Дано:**

$$\mathcal{E} = 24 \text{ В,}$$

$$U = 22 \text{ В,}$$

$$I = 4 \text{ А.}$$

**Найти:**

$$R; r; R_{\text{полн.}}$$

**Решение.**

Используя закон Ома для участка цепи и для полной цепи, находим

$$R = \frac{U}{I}; R = \frac{22 \text{ В}}{4 \text{ А}} = 5,5 \text{ Ом;}$$

$$r = \frac{\mathcal{E} - U}{I}; r = \frac{24 \text{ В} - 22 \text{ В}}{4 \text{ А}} = 0,5 \text{ Ом;}$$

$$R_{\text{полн}} = R + r; R_{\text{полн}} = 6 \text{ Ом.}$$

**Ответ:**  $R = 5,5 \text{ Ом; } r = 0,5 \text{ Ом; } R_{\text{полн}} = 6 \text{ Ом.}$

## 6. Сопротивление проводника

**6.1.** Сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания при температуре 20 °С равно 20 Ом, а при 3000 °С равно 250 Ом. Определить температурный коэффициент сопротивления вольфрама.

**Дано:**

$$t_1 = 20 \text{ °С,}$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом,}$$

$$t_2 = 3000 \text{ °С,}$$

$$R_2 = 250 \text{ Ом.}$$

**Найти**

$\alpha$ .

**Решение.**

Сопротивления проводников при разных температурах определяем по формулам:

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1); R_2 = R_0(1 + \alpha t_2).$$

Согласно условию задачи находим

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1 + \alpha t_1}{1 + \alpha t_2}; \alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1};$$

$$\alpha = \frac{250 - 20}{20 \cdot 3000 - 250 \cdot 20} \text{ К}^{-1} = 0,0042 \text{ К}^{-1}.$$

**Ответ:**  $\alpha = 0,0042 \text{ К}^{-1}.$

**6.2.** Сопротивление волоска лампы накаливания 50 Ом, сопротивление подводящих проводов 0,4 Ом. Определить падение напряжения на лампе накаливания и напряжение в подводящих проводах, если по ним проходит ток 2 А.

**Дано:**

$$R_1 = 50 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 0,4 \text{ Ом},$$

$$I = 2 \text{ А}.$$

**Найти:**

$$U_{\text{пад}}; U_{\text{пр}}.$$

**Решение.**

Напряжение (падение напряжения) равно произведению силы тока на сопротивление проводника:

$$U_{\text{пад}} = IR_1 = 2 \text{ А} \cdot 50 \text{ Ом} = 100 \text{ В};$$

$$U_{\text{пр}} = IR_2 = 2 \text{ А} \cdot 0,4 \text{ Ом} = 0,8 \text{ В}.$$

**Ответ:**  $U_{\text{пад}} = 100 \text{ В}; U_{\text{пр}} = 0,8 \text{ В}.$

**6.3.** Допустимый ток для изолированного медного провода площадью поперечного сечения 1 мм<sup>2</sup> при продолжительной работе электродвигателя равен 11 А. Сколько метров такой проволоки можно включить в сеть с напряжением 110 В без дополнительного сопротивления?

**Дано:**

$$S = 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$I = 11 \text{ А},$$

$$U = 110 \text{ В},$$

$$\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

**Найти**

$l.$

**Решение.**

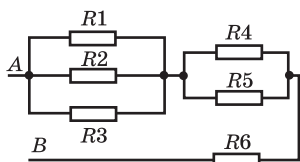
Из закона Ома для участка цепи находим сопротивление

$$\text{проводника } R = \frac{U}{I} \text{ и } R = \frac{\rho l}{S},$$

откуда

$$\frac{U}{I} = \frac{\rho l}{S} \text{ и } l = \frac{US}{\rho I}; l = \frac{110 \text{ В} \cdot 10^{-6} \text{ м}^2}{1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \cdot 11 \text{ А}} = 588,2 \text{ м}.$$

**Ответ:**  $l = 588,2 \text{ м}.$



**Рис. 12**

**6.4.** На рис. 12 дана схема соединения шести одинаковых резисторов сопротивлением по 60 Ом. Определить силу тока в каждом резисторе, если напряжение между точками А и В равно 220 В.

**Дано:**

$$R_1 = R_2 = \dots = R_6 =$$

$$= R = 60 \text{ Ом},$$

$$U_{AB} = 220 \text{ В}.$$

**Найти:**

$$I_1 = I_2 = I_3;$$

$$I_4 = I_5; I_6.$$

**Решение.**

При параллельном соединении  $n$  одинаковых резисторов общее сопротивление  $R_{\text{об}} = R/n$ . Следовательно,

$$R_{1-3} = \frac{R}{3} = 20 \text{ Ом};$$

$$R_{4-5} = \frac{R}{2} = 30 \text{ Ом}.$$

Общее сопротивление цепи

$$R_{AB} = R_{1-6} = R_{1-3} + R_{4-5} + R_6;$$

$$R_{AB} = 20 \text{ Ом} + 30 \text{ Ом} + 60 \text{ Ом} = 110 \text{ Ом}.$$

При последовательном соединении резисторов  $R_{1-3}$ ,  $R_{4-5}$  и  $R_6$  имеем

$$U_{1-3} [ U_{4-5} [ U_6 = R_{1-3} : R_{4-5} : R_6 = 2 [ 3 [ 6.$$

Так как  $U_{1-3} + U_{3-4} + U_6 = 220 \text{ В}$ , то

$$U_{1-3} = 220 \text{ В} \cdot \frac{2}{11} = 40 \text{ В}; U_{3-4} = 220 \text{ В} \cdot \frac{3}{11} = 60 \text{ В};$$

$$U_6 = 220 \text{ В} \cdot \frac{6}{11} = 120 \text{ В}.$$

Силу тока в каждом резисторе определим по закону Ома для цепи без ЭДС:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{U_{1-3}}{3R_{1-3}} = \frac{40 \text{ В}}{3 \cdot 20 \text{ Ом}} = 0,67 \text{ А};$$

$$I_4 = I_5 = \frac{U_{4-5}}{2R_{4-5}} = \frac{60 \text{ В}}{2 \cdot 30 \text{ Ом}} = 1 \text{ А};$$

$$I_6 = \frac{U_6}{R_6} = \frac{120 \text{ В}}{60 \text{ Ом}} = 2 \text{ А}.$$

**Ответ:**  $I_1 = I_2 = I_3 = 0,67 \text{ А}; I_4 = I_5 = 1 \text{ А}; I_6 = 2 \text{ А}.$



**6.5.** Найти защитное сопротивление проводника, который надо включить последовательно с лампой, рассчитанной на напряжение 110 В и силу тока 2 А, в сеть с напряжением 220 В.

**Дано:**

$$U = 110 \text{ В,}$$

$$I_0 = 2 \text{ А,}$$

$$U_0 = 220 \text{ В.}$$

**Найти**

$$R_{\text{защ}}.$$

**Решение.**

Напряжение на защитном сопротивлении  $U_{\text{защ}} = U_0 - U$ . При силе тока  $I_0$  имеем

$$R_{\text{защ}} = \frac{U_0 - U}{I_0};$$

$$R_{\text{защ}} = \frac{220 \text{ В} - 110 \text{ В}}{2 \text{ А}} = 55 \text{ Ом.}$$

**Ответ:**  $R_{\text{защ}} = 55 \text{ Ом.}$

## 7. Соединение источников тока

**7.1.** Как надо соединить два элемента в батарею — последовательно или параллельно, — чтобы во внешней цепи сопротивлением 8 Ом получить наибольшую силу тока? ЭДС элемента 24 В, его внутреннее сопротивление 2 Ом.

**Дано:**

$$R = 8 \text{ Ом,}$$

$$\mathcal{E} = 24 \text{ В,}$$

$$r = 2 \text{ Ом.}$$

**Найти**

$$I_1 [ I_2.$$

**Решение.**

Чтобы ответить на вопрос задачи, надо сравнить силы токов при разных соединениях.

При последовательном соединении двух одинаковых элементов в бата-

рею  $I_1 = \frac{2\mathcal{E}}{R + 2r}$ , при параллельном

соединении  $I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{2}}$ . Сравним  $I_1$  и  $I_2$ :

$$I_1 [ I_2 = (2R + r) [ (R + 2r);$$

$$I_1 [ I_2 = (2 \cdot 8 + 2) [ (8 + 2 \cdot 2) = 18 [ 12 = 1,5.$$

При последовательном соединении элементов в батарею сила тока будет в 1,5 раза больше, чем при параллельном соединении.

**Ответ:**  $I_1 | I_2 = 1,5$ .

**7.2.** Четыре аккумулятора с ЭДС 20 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом каждый соединены параллельно одноименными полюсами. Каково должно быть сопротивление внешней цепи, чтобы сила тока в ней не превышала 2 А?

**Дано:**

$\mathcal{E} = 20 \text{ В},$   
 $r = 1,2 \text{ Ом},$   
 $m = 4,$   
 $I = 2 \text{ А}.$

**Найти**  
 $R.$

**Решение.**

Так как аккумуляторы соединены параллельно, то согласно закону Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r/m};$$

$$R = \frac{\mathcal{E}}{I} - \frac{r}{m};$$

$$R = \frac{20 \text{ В}}{2 \text{ А}} - \frac{1,2 \text{ Ом}}{4} = 10 \text{ Ом} - 0,3 \text{ Ом} = 9,7 \text{ Ом}.$$

**Ответ:** Чтобы сила тока не превышала 2 А, необходимо соблюдать условие  $R \geq 9,7 \text{ Ом}.$

**7.3.** Три источника тока с ЭДС 1,1 В и внутренним сопротивлением 0,9 Ом каждый соединены последовательно разноименными полюсами и замкнуты на внешнюю цепь сопротивлением 3,9 Ом. Определить силу тока в цепи.

**Дано:**

$\mathcal{E} = 1,1 \text{ В},$   
 $r = 0,9 \text{ Ом},$   
 $R = 3,9 \text{ Ом},$   
 $n = 3.$

**Найти**  
 $I.$

**Решение.**

При последовательном соединении  $n$  одинаковых источников тока сила тока батареи равна

$$I = \frac{n\mathcal{E}}{R + nr};$$

$$I = \frac{3 \cdot 1,1 \text{ В}}{3,9 \text{ Ом} + 0,9 \text{ Ом} \cdot 3} = 0,5 \text{ А}.$$

**Ответ:**  $I = 0,5 \text{ А}.$



Рис. 13

**7.4.** Два аккумулятора с ЭДС  $\mathcal{E}_1 = 60$  В и  $\mathcal{E}_2 = 40$  В и внутренними сопротивлениями  $r_1 = 4$  Ом и  $r_2 = 1$  Ом соединены в батарею, как показано на

рис. 13. Определить силу тока короткого замыкания батареи.

**Дано:**

$$\mathcal{E}_1 = 60 \text{ В,}$$

$$\mathcal{E}_2 = 40 \text{ В,}$$

$$r_1 = 4 \text{ Ом,}$$

$$r_2 = 1 \text{ Ом.}$$

**Найти**

$$I_{\text{к.з.}}$$

**Решение.**

Согласно определению  $I_{\text{к.з.}} = \mathcal{E}_6 / r_6$ .

Так как ЭДС аккумуляторов имеют противоположные направления, то (см. рис. 13)  $\mathcal{E}_6 = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2$ ;  $r_6 = r_1 + r_2$ . Тогда

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{r_1 + r_2}, \quad I_{\text{к.з.}} = \frac{20 \text{ В}}{5 \text{ Ом}} = 4 \text{ А.}$$

**Ответ:**  $I_{\text{к.з.}} = 4 \text{ А.}$

**7.5.** Два гальванических элемента с ЭДС  $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E} = 10$  В и внутренними сопротивлениями  $r_1 = 0,6$  Ом и  $r_2 = 0,3$  Ом соединены параллельно, как показано на рис. 14. Определить силу тока, проходящего через резистор сопротивлением 4,8 Ом, и напряжение на зажимах батареи.

**Дано:**

$$\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 =$$

$$= \mathcal{E} = 10 \text{ В,}$$

$$r_1 = 0,6 \text{ Ом,}$$

$$r_2 = 0,3 \text{ Ом,}$$

$$R = 4,8 \text{ Ом.}$$

**Найти:**

$$I; U.$$

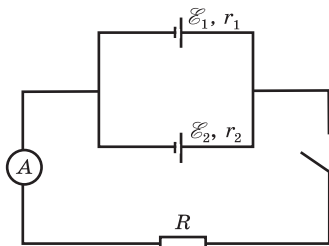


Рис. 14

**Решение.**

Так как гальванические элементы имеют одинаковые ЭДС и соединены параллельно одноименными полюсами,

то  $\mathcal{E}_6 = \mathcal{E} = 10$  В;  $r_6 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$ .

По закону Ома для полной цепи сила тока

$$I = \frac{\mathcal{E}_6}{R + r_6} = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}; I = \frac{10 \text{ В}}{4,8 \text{ Ом} + \frac{0,6 \text{ Ом} \cdot 0,3 \text{ Ом}}{0,6 \text{ Ом} + 0,3 \text{ Ом}}} = 2 \text{ А.}$$

Напряжение на зажимах батареи

$$U = IR, U = 2 \text{ А} \cdot 4,8 \text{ Ом} = 9,6 \text{ В.}$$

Ответ:  $I = 2 \text{ А}$ ;  $U = 9,6 \text{ В}$ .

## 8. Закон Кирхгофа для разветвленной цепи

8.1. На рис. 15 дана схема сложной электрической цепи постоянного тока. Определить силу тока в каждой ветви цепи и его направление, а также падение напряжения на резисторе  $R$ , если ЭДС и внутренние сопротивления источников тока соответственно равны  $\mathcal{E}_1 = 20 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 42 \text{ В}$ ,

$r_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = 4 \text{ Ом}$ , сопротивление резистора  $R = 26 \text{ Ом}$ .

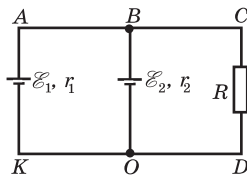


Рис. 15

**Дано:**

$$\mathcal{E}_1 = 20 \text{ В,}$$

$$\mathcal{E}_2 = 42 \text{ В,}$$

$$r_1 = 2 \text{ Ом,}$$

$$r_2 = 4 \text{ Ом,}$$

$$R = 26 \text{ Ом.}$$

**Найти:**

$$I_1; I_2; I_3; U_3.$$

**Решение.**

Выберем условно направления токов в цепи:  $I_1$  — от  $K$  к  $A$ ,  $I_2$  — от  $B$  к  $O$  и  $I_3$  — от  $D$  к  $C$ .

Запишем уравнение токов по правилу узлов:

$$I_2 - I_1 - I_3 = 0 \text{ (узел } O\text{).}$$

Составим уравнения падений напряжений в замкнутых контурах:

контур *АВОКА*

$$I_2 r_2 - \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_1 + I_1 r_2 = 0,$$

$$4I_2 - 42 + 20 + 2I_1 = 0,$$

$$I_1 + 2I_2 = 11;$$

контур  $BCDOB$

$$\begin{aligned} -I_2 r_2 + \mathcal{E}_1 - I_3 R &= 0, \\ -4I_2 + 42 - 26I_3 &= 0, \\ 2I_2 + 13I_3 &= 21. \end{aligned}$$

Составим систему уравнений и решим ее:

$$\begin{cases} I_1 + I_3 = I_2, \\ I_1 + 2I_2 = 11, \\ 2I_2 + 13I_3 = 21. \end{cases}$$

Силы токов и их направления:  $I_1 = 3$  А (от  $K$  к  $A$ ),  $I_2 = 4$  А (от  $B$  к  $O$ ),  $I_3 = 1$  А (от  $D$  к  $C$ ), падение напряжения на резисторе  $R$  равно

$$U_3 = I_3 R = 1 \text{ А} \cdot 26 \text{ Ом} = 26 \text{ В}.$$

**Ответ:**  $I_1 = 3$  А;  $I_2 = 4$  А;  $I_3 = 1$  А;  $U_3 = 26$  В.

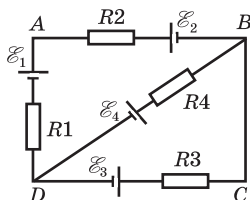
**8.2.** На рис. 16 дана схема сложной электрической цепи постоянного тока. Определить значения и направления токов, проходящих через резисторы, сопротивления которых  $R_1 = R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 6$  Ом,  $R_4 = 4$  Ом и ЭДС источников тока  $\mathcal{E}_1 = 30$  В,  $\mathcal{E}_2 = 4$  В,  $\mathcal{E}_3 = 8$  В и  $\mathcal{E}_4 = 6$  В. Внутреннее сопротивление источников тока не учитывать.

**Дано:**

$$\begin{aligned} R_1 &= R_2 = 2 \text{ Ом}, \\ R_3 &= 6 \text{ Ом}, \\ R_4 &= 4 \text{ Ом}, \\ \mathcal{E}_1 &= 30 \text{ В}, \\ \mathcal{E}_2 &= 4 \text{ В}, \\ \mathcal{E}_3 &= 8 \text{ В}, \\ \mathcal{E}_4 &= 6 \text{ В}. \end{aligned}$$

**Найти:**

$$I_1; I_3; I_4.$$



**Рис. 16**

**Решение.**

Электрическая цепь состоит из двух узлов ( $B$  и  $D$ ) и трех ветвей ( $BAD$ ,  $BD$  и  $DCD$ ). В каждой ветви ток может идти только в одном направлении.

Выберем условно направления токов в каждой ветви:  $I_1$  — от  $B$  к  $A$  и  $D$ ,  $I_3$  — от  $D$  к  $C$  и  $B$ ,  $I_4$  — от  $D$  к  $B$  через  $R_4$ .

Запишем уравнение токов по правилу узлов:

$$I_3 + I_4 = I_1.$$

Составим уравнения падений напряжений в замкнутых контурах:

контур  $ABDA$

$$- I_1 R_2 - \mathcal{E}_2 - I_4 R_4 - \mathcal{E}_4 - I_1 R_1 + \mathcal{E}_1 = 0,$$

$$- I_1 (R_1 + R_2) - \mathcal{E}_2 - I_4 R_4 - \mathcal{E}_4 + \mathcal{E}_1 = 0,$$

$$- 4I_1 - 4 - 4I_4 - 6 + 30 = 0,$$

$$I_1 + I_4 = 5;$$

контур  $BCDB$

$$- I_3 R_3 - \mathcal{E}_3 + \mathcal{E}_4 + I_4 R_4 = 0,$$

$$- 6I_3 - 8 + 6 + 4I_4 = 0,$$

$$- 3I_3 + 2I_4 = 1.$$

Составим систему уравнений и решим ее:

$$\begin{cases} I_3 + I_4 = I_1, \\ I_1 + I_4 = 5, \\ - 3I_3 + 2I_4 = 1; \end{cases} \quad \begin{cases} I_1 = 3 \text{ A}, \\ I_3 = 1 \text{ A}, \\ I_4 = 2 \text{ A}. \end{cases}$$

Направления токов совпадают с условно выбранными направлениями, так как полученные силы токов положительные.

**Ответ:**  $I_1 = 3 \text{ A}$ ;  $I_3 = 1 \text{ A}$ ;  $I_4 = 2 \text{ A}$ .

## 9. Работа и мощность постоянного электрического тока

**9.1.** Какую работу совершает электрическое поле по перемещению  $5 \cdot 10^{18}$  электронов на участке цепи с разностью потенциалов  $20 \text{ В}$ ?

**Дано:**  
 $N = 5 \cdot 10^{18}$ ,  
 $U = 20 \text{ В}$ ,  
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

**Найти**  
А.

**Решение.**  
Работа электрического поля по перемещению зарядов  
 $A = QU$ , где  $Q = eN$ .

Отсюда

$$A = eNU;$$

$$A = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 5 \cdot 10^{18} \cdot 20 \text{ В} = 16 \text{ Дж}.$$

**Ответ:**  $A = 16 \text{ Дж}$ .

**9.2.** Источник тока с ЭДС 120 В и внутренним сопротивлением 2 Ом замкнут на внешнее сопротивление 58 Ом. Определить полную и полезную мощности источника тока.

**Дано:**  
 $\mathcal{E} = 120 \text{ В}$ ,  
 $r = 2 \text{ Ом}$ ,  
 $R = 58 \text{ Ом}$ .

**Найти:**  
 $P_{\text{полн}}$ ;  $P_{\text{полезн}}$ .

**Решение.**  
Полная мощность источника тока  
 $P_{\text{полн}} = I\mathcal{E}$ , полезная мощность  
 $P_{\text{полезн}} = I^2R$ . По закону Ома для пол-

ной цепи  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ . Тогда

$$P_{\text{полн}} = \frac{\mathcal{E}^2}{R+r}; P_{\text{полн}} = \frac{120 \cdot 120 \text{ В}^2}{60 \text{ Ом}} = 240 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{полезн}} = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}, P_{\text{полезн}} = \frac{120 \cdot 120 \text{ В}^2 \cdot 58 \text{ Ом}}{60 \cdot 60 \text{ Ом}} = 232 \text{ Вт}.$$

**Ответ:**  $P_{\text{полн}} = 240 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{полезн}} = 232 \text{ Вт}$ .

**9.3.** Две электрические лампы сопротивлениями 200 и 300 Ом параллельно включены в сеть. Какая из ламп потребляет большую мощность и во сколько раз?

**Дано:**  
 $R_1 = 200 \text{ Ом}$ ,  
 $R_2 = 300 \text{ Ом}$ .

**Найти**  
 $P_1$  |  $P_2$ .

**Решение.**  
При параллельном соединении потребителей электрической энергии напряжения на каждой из ветвей и между узлами разветвления одинаковы; следовательно,

$$P_1 = \frac{U^2}{R_1}; P_2 = \frac{U^2}{R_2};$$

$$P_1 | P_2 = R_2 | R_1; P_1 | P_2 = 3 | 2 = 1,5; P_1 = 1,5 P_2.$$

При параллельном включении лампа с меньшим сопротивлением потребляет бóльшую мощность. В данном случае лампа сопротивлением 200 Ом потребляет мощность в 1,5 раза большую, чем лампа сопротивлением 300 Ом.

**Ответ:**  $P_1 = 1,5 P_2$ .

**9.4.** Телевизор, потребляемая мощность которого 150 Вт, работает от сети напряжением 220 В. Какой плавкий предохранитель следует установить в телевизоре, если в наличии имеются предохранители на 0,5, 1 и 2 А?

**Дано:**

$$P = 150 \text{ Вт},$$

$$U = 220 \text{ В}.$$

**Найти**

$I$ .

**Решение.**

Мощность, потребляемая телевизором, определяется по формуле  $P = IU$ . Отсюда

$$I = \frac{P}{U}; \quad I = \frac{150 \text{ Вт}}{220 \text{ В}} = 0,68 \text{ А}.$$

**Ответ:**  $I = 0,68 \text{ А}$ . Необходимо поставить предохранитель на 1 А.

**9.5.** В жилом доме одновременно включены 50 ламп по 40 Вт, 80 ламп по 60 Вт и 10 ламп по 100 Вт. Определить силу тока во внешней цепи, если напряжение в сети 220 В.

**Дано:**

$$P_1 = 40 \text{ Вт},$$

$$m = 50,$$

$$P_2 = 60 \text{ Вт},$$

$$n = 80,$$

$$P_3 = 100 \text{ Вт},$$

$$k = 10,$$

$$U_{об} = 220 \text{ В}.$$

**Найти**

$I_{об}$ .

**Решение.**

Сила тока в общей (неразветвленной) части цепи  $I_{об} = \frac{P_{\Sigma}}{U_{\Sigma}}$ .

Потребляемая мощность цепи

$$P_{об} = mP_1 + nP_2 + kP_3.$$

Находим

$$I_{об} = \frac{mP_1 + nP_2 + kP_3}{U_{об}};$$

$$I_{об} = \frac{40 \text{ Вт} \cdot 50 + 60 \text{ Вт} \cdot 80 + 100 \text{ Вт} \cdot 10}{220 \text{ В}} = 35,5 \text{ А}.$$

**Ответ:**  $I_{об} = 35,5 \text{ А}$ .



## 10. Тепловое действие тока

**10.1.** Сколько времени будут нагреваться 2 л воды от 20 °С до кипения (100 °С) в электрическом чайнике мощностью 600 Вт, если его КПД составляет 80%? Удельная теплоемкость воды 4200 Дж/(кг · К).

**Дано:**

$$m = 2 \text{ кг},$$

$$\Delta T = 80 \text{ К},$$

$$P = 600 \text{ Вт},$$

$$\eta = 0,8,$$

$$c = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

**Найти**

$t$ .

**Решение.**

Количество теплоты, полученное водой при нагревании,  $Q_1 = cm\Delta T$ . Количество теплоты, выделенное током и израсходованное только на нагревание воды,  $Q_2 = \eta Pt$ . Составим уравнение теплового баланса и решим его относительно  $t$ :

$$cm\Delta T = \eta Pt,$$

откуда время, за которое нагревается вода от 20 °С до кипения,

$$t = \frac{cm\Delta T}{\eta P},$$

$$t = \frac{4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 2 \text{ кг} \cdot 80 \text{ К}}{0,8 \cdot 600 \text{ Вт}} = 1400 \text{ с} = 23 \text{ мин } 20 \text{ с}.$$

**Ответ:**  $t = 23 \text{ мин } 20 \text{ с}$ .

**10.2.** Два резистора сопротивлениями  $R_1 = 20 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 30 \text{ Ом}$  включены в сеть: а) последовательно; б) параллельно. В каком случае и во сколько раз выделится больше теплоты в этих резисторах за одно и то же время?

**Дано:**

$$R_1 = 20 \text{ Ом},$$

$$R_2 = 30 \text{ Ом}.$$

**Найти**

$$Q_{\text{посл}} [ Q_{\text{пар}} ]$$

**Решение.**

Так как резисторы включаются в одну и ту же электрическую сеть, то напряжения на их концах независимо от способа соединения одинаковы. Общее сопротивление резисторов:

при последовательном соединении  $R_{\text{посл}} = R_1 + R_2$ , при

параллельном соединении  $R_{\text{пар}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ . За одно и то же время в случаях а) и б) выделится количество теплоты:

$$Q_{\text{пос}} = \frac{U^2 t}{R_1 + R_2};$$

$$Q_{\text{пар}} = \frac{U^2 (R_1 + R_2)}{R_1 R_2}.$$

Находим:

$$\frac{Q_{\text{пос}}}{Q_{\text{пар}}} = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2};$$

$$\frac{Q_{\text{пос}}}{Q_{\text{пар}}} = \frac{20 \cdot 30}{(20 + 30)^2} = \frac{6}{25}.$$

При параллельном соединении данных резисторов выделится количество теплоты в 4,2 раза больше, чем при последовательном.

**Ответ:**  $Q_{\text{пар}} \uparrow Q_{\text{пос}} = 4,2$ .

**10.3.** Через поперечное сечение спирали нагревательного элемента паяльника каждую секунду проходит  $0,5 \cdot 10^{19}$  электронов проводимости. Определить мощность тока, выделяемую в паяльнике, если он подключен в сеть с напряжением 220 В.

**Дано:**  
 $N = 0,5 \cdot 10^{19}$ ,  
 $t = 1$  с,  
 $U = 220$  В,  
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

**Найти**  
 $P$ .

**Решение.**

Мощность тока  $P = IU$ , сила тока  $I = \frac{Q}{t}$ . Находим

$$P = \frac{QU}{t} = \frac{eNU}{t};$$

$$P = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,5 \cdot 10^{19} \cdot 220 \text{ В}}{1 \text{ с}} = 176 \text{ Вт}.$$

**Ответ:**  $P = 176$  Вт.