

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства»  
(ПГУАС)

Н.А. Очкина

**СБОРНИК ТЕСТОВ И ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ  
Часть 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

Рекомендовано Редсоветом университета  
в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся  
по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство»

Под общей ред. доктора технических наук,  
профессора Г.И. Грейсуха

Пенза 2014

УДК 537.221 (075.8)  
ББК 22.33 я73  
О-95

Рецензенты: кандидат технических наук, доцент  
С.В. Тертычная (ПГУ);  
кандидат физико-математических  
наук, доцент П.П. Мельниченко  
(ПГУАС)

**Очкина Н.А.**

Сборник тестов и задач по физике. Электричество и магнетизм.  
О-95 Часть 1. Электричество: учеб. пособие / Н.А. Очкина; под общ. ред.  
Г.И. Грейсуха. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 116 с.

Приведены основные типы тестов и задач по курсу физики (разделы «Электростатика», «Постоянный ток»), составленных в соответствии с Государственным образовательным стандартом и типовой программой. Освещены вопросы, являющиеся основой профессиональной подготовки студентов инженерно-строительных специальностей. В каждой теме представлены несколько задач с подробным решением.

Учебное пособие подготовлено на кафедре «Физика и химия» и предназначено для использования студентами, обучающимися по направлению 08.03.01 «Строительство», на практических занятиях и при самостоятельной работе. Пособие также может быть использовано студентами других форм обучения: заочной, дистанционной, экстерната.

© Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства, 2014  
© Очкина Н.А., 2014

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый сборник тестов и задач по физике представляет собой первую часть подготовленного кафедрой «Физика и химия» учебного пособия «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ» для студентов дневного отделения.

Учебное пособие составлено в соответствии с действующей типовой программой курса физики для инженерно-технических специальностей высших учебных заведений дневной формы обучения с ограниченным числом часов по физике, с возможностью его использования студентами заочной формы обучения, а также студентами экстерната и дистанционного обучения.

Основными целями пособия являются:

- формирование у студентов целостного систематизированного представления о явлениях природы, в том числе об электромагнитных явлениях;
- освоение ими методов решения задач по электромагнетизму;
- формирование понимания роли законов физики в описании явлений природы;
- ознакомление с различными областями технического приложения законов электромагнетизма.

Достижение поставленных целей с учетом относительно небольшого объема часов учебной программы потребовало взвешенного подхода к отбору материала, обеспечения сбалансированного изложения с единых позиций наиболее фундаментальных вопросов и их прикладных аспектов.

При подборе и формулировке тестов и задач основное внимание обращалось на то, чтобы они способствовали развитию у студентов физического мышления и более глубокому пониманию теоретического материала.

## ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие состоит из тестовых заданий и задач, сгруппированных по разделам:

- 1) Электростатика.
- 2) Постоянный электрический ток.

В начале каждого из параграфов соответствующего раздела приведены основные формулы и законы, а также примеры решения задач. Затем следует перечень тестов и задач, предназначенных для самостоятельного решения.

Тестовые задания и задачи предназначены для проведения промежуточного контроля качества обучения по физике, что должно способствовать улучшению организации учебного процесса, индивидуальной самостоятельной работы студентов при изучении физики.

Особо необходимо отметить наличие в пособии рисунков, поясняющих условия заданий для самостоятельного решения.

В книге имеется библиографический список основной и дополнительной литературы, который поможет в подготовке к выполнению представленных заданий.

Учебное пособие может быть использовано преподавателями, работающими со студентами различных направлений подготовки.

# 1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## 1.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ. ЗАКОН КУЛОНА

### Основные формулы

**Электрический заряд**  $q$  – это физическая величина, характеризующая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные взаимодействия и определяющая значения сил и энергии при таких взаимодействиях.

Существует два рода электрических зарядов, условно названных *положительными* и *отрицательными*. Положительный заряд возникает, например, на стекле, натертом кожей или бумагой, отрицательный – на янтаре или пластмассе, натертых шерстью.

Заряды могут передаваться (например, при непосредственном контакте) от одного тела к другому. В отличие от массы тела электрический заряд не является неотъемлемой характеристикой данного тела. Одно и то же тело в разных условиях может иметь разный заряд.

Электрически заряженные тела *взаимодействуют* друг с другом; при этом разноименно заряженные тела притягиваются, а одноименно заряженные – отталкиваются.

Электрический заряд дискретен: существует минимальный *элементарный электрический заряд* ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), которому кратны все электрические заряды тел.

Одним из фундаментальных законов природы является экспериментально установленный *закон сохранения электрического заряда*: **в изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остается постоянной**:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}.$$

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что в замкнутой системе тел не могут наблюдаться процессы рождения или исчезновения зарядов только одного знака.

Основным законом электростатики является закон взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов в вакууме, экспериментально установленный в 1785 году французским физиком Шарлем Кулоном: **сила взаимодействия двух неподвижных точечных электрических зарядов  $q_1$  и  $q_2$  в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между зарядами**:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2},$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>;

$\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/(Н·м<sup>2</sup>).

В случае, когда электрические заряды расположены в диэлектрике, силу взаимодействия между ними определяют по формуле

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\varepsilon r^2},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** На двух одинаковых каплях воды находится по лишнему электрону, причем сила электростатического отталкивания капелек уравновешивает гравитационную силу их взаимного притяжения. Каков радиус капель? Плотность воды  $10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Дано:

$$m_1 = m_2 = m$$

$$q_1 = q_2 = e$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$R_1 = R_2 = R$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

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

$$F_e = F_G$$

$$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$R - ?$$

Решение:

Согласно закону Кулона сила электростатического отталкивания одноименно заряженных капель

$$F_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{r^2},$$

а сила их гравитационного взаимодействия

$$F_G = G \frac{m_1 m_2}{r^2} = G \frac{m^2}{r^2}.$$

По условию задачи  $F_e = F_G$ .

Подставив в это равенство выражения для сил, получим

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = G \frac{m^2}{r^2},$$

или

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = G m^2. \quad (1)$$

Масса капли

$$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = \frac{16}{9} G \pi^2 R^6 \rho^2, \text{ откуда } R = \sqrt[6]{\frac{9e^2}{64\pi^3 \varepsilon_0 G \rho^2}}.$$

Выполним расчет

$$R = \sqrt[6]{\frac{9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2}{64 \cdot 3,14^3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 10^6}} = 1,64 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Ответ:  $R = 1,64 \cdot 10^{-4}$  м.

**Пример 2.** Два заряда в вакууме на расстоянии 11 см взаимодействуют с такой же силой, как в скипидаре на расстоянии 7,4 см. Определите диэлектрическую проницаемость скипидара.

Дано:	СИ	Решение:
$r_1 = 11 \text{ см}$	$11 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	Сила электростатического взаимодействия зарядов в вакууме
$r_2 = 7,4 \text{ см}$	$7,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$	$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ q_1  q_2 }{r^2},$
$F_1 = F_2$		а в скипидаре
$\epsilon - ?$		$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{ q_1  q_2 }{r^2}.$

По условию задачи  $F_1 = F_2$ . Подставив в это равенство выражения сил, получим


$$\frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r_2^2}, \text{ откуда } \epsilon = \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2.$$

Выполним расчет:

$$\epsilon = \frac{121 \cdot 10^{-4}}{54,76 \cdot 10^{-4}} = 2,2.$$

Ответ:  $\epsilon = 2,2$ .

**Пример 3.** Свинцовый шарик плотностью  $11,3 \text{ г/см}^3$  и диаметром  $0,5 \text{ см}$  помещен в глицерин с плотностью  $1,26 \text{ г/см}^3$ . Определите заряд шарика, если в однородном электрическом поле он оказался взвешенным. Электрическое поле направлено вверх, его напряженность  $4 \text{ кВ/см}$ .

Дано:	СИ	Решение:
$\rho_1 = 11,3 \text{ г/см}^3$	$11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$	Так как шарик находится в покое, то согласно первому закону Ньютона
$d = 0,5 \text{ см}$	$5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$\sum \vec{F}_i = 0$ , или
$E = 4 \text{ кВ/см}$	$4 \cdot 10^5 \text{ В/м}$	$m\vec{g} + \vec{F}_e + \vec{F}_A = 0.$
$\rho_2 = 1,26 \text{ г/см}^3$	$1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$	В скалярном виде это уравнение (с учетом направлений сил, действующих на шарик) имеет вид
$q - ?$		$mg - F_e - F_A = 0. \quad (1)$
		Масса шарика
		$m = \rho V = \rho_1 \frac{4}{3} \pi R^3 = \rho_1 \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} = \rho_1 \frac{1}{6} \pi d^3.$

Сила, действующая на заряженный шарик со стороны электростатического поля,

$$F_e = qE.$$

Архимедова сила

$$F_A = \rho_2 g V = \rho_2 g \frac{4}{3} \pi \frac{d^3}{8} = \rho_2 g \frac{1}{6} \pi d^3.$$

Подставляя в выражение (1) значения массы шарика, силы, действующей на шарик со стороны электростатического поля и архимедовой силы, получим

$$\rho_1 g \frac{1}{6} \pi d^3 - qE - \rho_2 g \frac{1}{6} \pi d^3 = 0,$$

откуда

$$q = \frac{\pi d^3 g (\rho_1 - \rho_2)}{6E}.$$

Выполним расчет:

$$q = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 10^{-9} \cdot 9,8 \cdot 10^3 \cdot 10,04}{6 \cdot 4 \cdot 10^5} = 1,61 \cdot 10^{-8} \text{ Кл.}$$

Ответ:  $q = 1,61 \cdot 10^{-8}$  Кл.

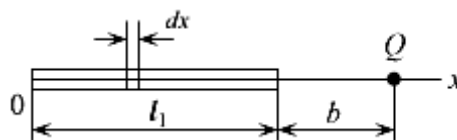
**Пример 4.** На продолжении тонкого стержня (нити) длиной  $l_1$ , несущего заряд  $q$ , равномерно распределенный по длине стержня с линейной плотностью  $\tau = \frac{q}{l_1}$ , расположен точечный заряд  $Q$  на расстоянии  $b$  от одного из концов стержня. Определите силу взаимодействия стержня и заряда.

Дано:

$l_1$  – длина стержня  
 $\tau$  – линейная плотность заряда стержня  
 $b$  – расстояние заряда  $Q$  от конца стержня

$F$  – ?

Решение:



Закон Кулона позволяет вычислить силу взаимодействия точечных зарядов. По условию задачи, один из зарядов не является точечным, а представляет собой заряд, равномерно распределенный по длине стержня. Однако, если выделить на стержне дифференциально малый участок длиной  $dx$ , то находящийся на нем заряд  $dq = \tau dx$  можно рассматривать как точечный и тогда по закону Кулона сила взаимодействия между зарядами  $Q$  и  $dq$

$$dF = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q\tau dx}{r^2},$$

где  $r$  – расстояние от выделенного элемента до заряда  $Q$ .



Из рисунка видно, что  $r = x + b$ , где  $x$  – расстояние от выделенного элемента до правого конца стержня.

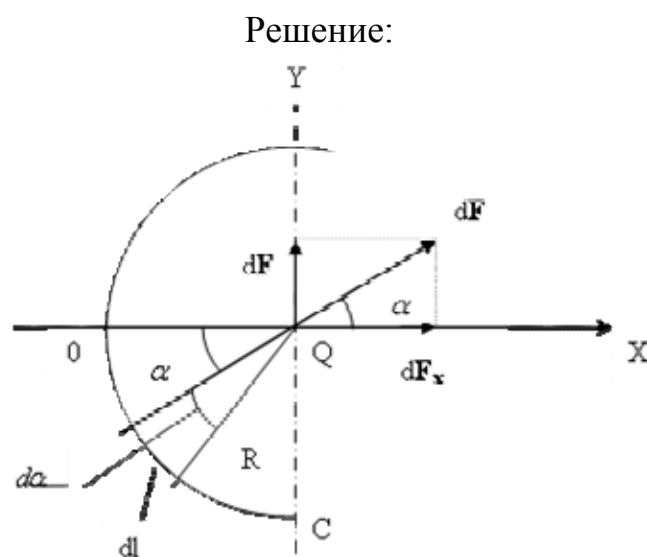
На такие элементы можно разбить всю длину стержня. Векторы сил взаимодействия элементов с зарядом  $Q$  направлены вдоль оси  $x$  и являются силами отталкивания, если заряды  $Q$  и  $q$  одного знака. Результирующая сила  $F$  взаимодействия стержня и заряда также направлена вдоль оси  $x$  и равна по величине

$$F = \frac{Q\tau}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{l_1} \frac{dx}{(x+b)^2} = \frac{Q\tau}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{l_1+b} \right).$$

Ответ:  $F = \frac{Q\tau}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{l_1+b} \right).$

**Пример 5.** Тонкое полукольцо радиусом  $R = 10$  см несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью  $\tau = 1$  мкКл/м. В центре кривизны полукольца находится заряд  $Q = 20$  нКл. Определите силу взаимодействия точечного заряда и заряженного полукольца.

Дано:	СИ
$R = 10$ см	0,1 м
$\tau = 1$ мкКл/м	$10^{-6}$ Кл/м
$Q = 20$ нКл	$2 \cdot 10^{-8}$ Кл
$F - ?$	



Равномерно заряженное полукольцо несет протяженный заряд. Длина полукольца  $\pi R$  сравнима с расстоянием  $R$  до точечного заряда  $Q$ .

Разделим полуокружность на столь малые дуги длиной  $dl$ , чтобы заряд каждой такой дуги  $dq = \tau dl$  можно было считать точечным. Каждый из зарядов  $dq$  взаимодействует с точечным зарядом  $Q$  с силой

$$dF = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q\tau dl}{r^2}.$$

Вектор  $d\vec{F}$  направлен вдоль прямой, соединяющей заряды  $dq$  и  $Q$ , и составляет с осью  $X$  угол  $\alpha$ .

Разложим вектор  $d\vec{F}$  на два составляющих вектора:  $d\vec{F}_x$  и  $d\vec{F}_y$ . Из рисунка видно, что  $dF_x = dF \cos \alpha$ ;

$$dF_y = dF \sin \alpha.$$

Любому элементарному заряду  $dq$  в верхней полуплоскости найдется симметрично расположенный заряд в нижней полуплоскости. При геометрическом сложении сил  $d\vec{F}$  их составляющие  $d\vec{F}_y$ , перпендикулярные оси  $X$ , взаимно компенсируются, а составляющие  $d\vec{F}_x$ , направленные вдоль оси  $X$ , складываются алгебраически.

$$dF_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q\tau dl \cos \alpha}{R^2}.$$

В качестве переменной интегрирования выберем угол  $\alpha$ . Длина дуги  $dl = R d\alpha$ , тогда

$$dF_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q\tau \cos \alpha d\alpha}{R}.$$

$$F = \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} dF_x = \frac{Q\tau}{4\pi\epsilon_0 R} \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \alpha d\alpha = \frac{Q\tau}{4\pi\epsilon_0 R} (\sin(\pi/2) - \sin(-\pi/2)) = \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon_0 R}.$$

$$\text{Ответ: } F = \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon_0 R}.$$

### Тесты

1. Два точечных электрических заряда  $q$  и  $2q$  на расстоянии  $r$  друг от друга притягиваются с силой  $F$ . С какой силой будут притягиваться заряды  $2q$  и  $2q$  на расстоянии  $2r$ ?

- 1)  $F/2$ ;                      2)  $F$ ;                      3)  $2F$ ;                      4)  $4F$

2. Сила взаимодействия двух отрицательно заряженных частиц, находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга, равна  $F$ . Знак заряда одной из частиц изменили на противоположный. Чтобы сила взаимодействия не изменилась, расстояние между частицами надо...

- 1) увеличить в 2 раза;  
 2) уменьшить в  $\sqrt{2}$  раз;  
 3) оставить без изменения;  
 4) уменьшить в 2 раза.

3. Сила взаимодействия двух отрицательных точечных зарядов, находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга, равна  $F$ . Расстояние между зарядами уменьшили в два раза. Чтобы сила взаимодействия между зарядами не изменилась, надо

- 1) один из зарядов увеличить по модулю в 2 раза;
- 2) один из зарядов уменьшить по модулю в 2 раза;
- 3) каждый заряд уменьшить по модулю в 2 раза;
- 4) каждый заряд увеличить по модулю в 2 раза.

4. Если два точечных заряда, находящихся в вакууме, поместить в воду, диэлектрическая проницаемость которой равна 81, не меняя расстояние между ними, то сила кулоновского взаимодействия между зарядами

- 1) увеличится в 81 раз;
- 2) увеличится в 9 раз;
- 3) не изменится;
- 4) уменьшится в 81 раз.

5. Если два точечных заряда, находясь в воздухе на расстоянии 5 см друг от друга, взаимодействуют с силой, равной 120 мкН, а в некоторой непроводящей жидкости на расстоянии 10 см – с силой, равной 15 мкН, то диэлектрическая проницаемость жидкости равна

- 1) 1,5;
- 2) 2,0;
- 3) 5;
- 4) 3.

6. Два точечных заряда взаимодействуют в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$ , на расстоянии  $r$ . Чтобы сила взаимодействия этих зарядов осталась прежней в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ , заряды нужно поместить в ней на расстоянии друг от друга, равном

- 1)  $r\sqrt{\epsilon_2 / \epsilon_1}$ ;
- 2)  $r\epsilon_1 / \epsilon_2$ ;
- 3)  $r\epsilon_2 / \epsilon_1$ ;
- 4)  $r\sqrt{\epsilon_1 / \epsilon_2}$ .

7. Два одинаковых маленьких металлических шарика, заряженных положительными зарядами  $q$  и  $4q$ , находятся на расстоянии  $r$  друг от друга. Шарики привели в соприкосновение. Чтобы сила взаимодействия между шариками после этого осталась бы прежней, их надо развести на расстояние

- 1)  $0,80r$ ;
- 2)  $2r$ ;
- 3)  $1,25r$ ;
- 4)  $r$ .

8. Два одинаковых маленьких металлических шарика заряжены разноименными зарядами  $q$  и  $-5q$ . Шарики привели в соприкосновение и раздвинули на прежнее расстояние. При этом модуль силы кулоновского взаимодействия шариков

- 1) не изменился;
- 2) уменьшился в 1,8 раза;
- 3) уменьшился в 1,25 раза;
- 4) увеличился в 1,25 раза.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Два одинаковых шарика подвешены в одной точке на нитях одинаковой длины. Получив одинаковый заряд, шарики оттолкнулись так, что нити разошлись на угол  $\alpha$ . Шарики погружаются в масло плотностью  $\rho_0 = 800 \text{ кг/м}^3$ . Определите диэлектрическую проницаемость  $\varepsilon$  масла, если угол расхождения нитей при погружении в него шариков остается неизменным. Плотность материала шариков  $\rho = 1600 \text{ кг/м}^3$ .

Ответ:  $\varepsilon = 2$ .

2. Два одинаковых небольших металлических шарика с зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $l = 0,2 \text{ м}$  друг от друга, притягиваются с силой  $F_1 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ . После того как шарики привели в соприкосновение и опять развели на прежнее расстояние, они стали отталкиваться с силой  $F_2 = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$ . Найдите  $q_1$  и  $q_2$ .

Ответ:  $q_1 = -0,267 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ ,  $q_2 = 0,067 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ .

3. Даны два шарика массой  $m = 1 \text{ г}$  каждый. Какой заряд  $q$  нужно сообщить каждому шарiku, чтобы сила взаимного отталкивания зарядов уравновесила силу взаимного притяжения шариков по закону тяготения Ньютона? Рассматривать шарики как материальные точки.

Ответ:  $q = 3,447 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$ .

4. Расстояние между двумя точечными зарядами  $q_1 = 1 \text{ мкКл}$  и  $q_2 = -1 \text{ мкКл}$  равно  $10 \text{ см}$ . Определите силу  $F$ , действующую на точечный заряд  $Q = 0,1 \text{ мкКл}$ , удаленный на  $r_1 = 6 \text{ см}$  от первого и  $r_2 = 8 \text{ см}$  от второго зарядов.

Ответ:  $F = 287 \text{ мН}$ .

5. В элементарной теории атома водорода принимают, что электрон обращается вокруг ядра по круговой орбите. Определите скорость электрона, если радиус орбиты  $r = 0,53 \text{ пм}$ , а также частоту вращения электрона.

Ответ:  $v = 219 \text{ км/с}$ ;  $\nu = 6,59 \cdot 10^{14} \text{ Гц}$ .

6. Два положительных заряда  $q$  и  $4q$  закреплены на расстоянии  $60 \text{ см}$  друг от друга. Определите, в какой точке на прямой, соединяющей заряды, следует поместить третий заряд  $Q$ , чтобы он находился в равновесии. Укажите, какой знак должен иметь этот заряд для того, чтобы равновесие было устойчивым, если перемещения заряда возможны только вдоль прямой, проходящей через закрепленные заряды.

Ответ: на расстоянии  $x = 40 \text{ см}$  от заряда  $4q$ ; положительный.

7. В вершинах квадрата находятся одинаковые заряды  $q = 0,3$  нКл каждый. Какой отрицательный заряд  $Q$  нужно поместить в центр квадрата, чтобы сила взаимного отталкивания положительных зарядов была уравновешена силой притяжения отрицательного заряда?

Ответ:  $Q = -0,287$  нКл.

8. Тонкий стержень длиной  $l = 20$  см несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью  $\tau = 10^{-9}$  Кл/м. На расстоянии  $a = 10$  см от стержня находится точечный заряд  $Q = 1$  нКл. Заряд равноудален от концов стержня. Определите силу взаимодействия заряда со стержнем.

Ответ:  $F = 1,4 \cdot 10^{-6}$  Н.

9. Тонкая бесконечная нить согнута под углом  $90^\circ$ . Нить несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью  $\tau = 1$  мкКл/м. Определите силу, действующую на точечный заряд  $Q = 0,1$  мкКл, расположенный на продолжении одной из сторон и удаленный от вершины угла на  $a = 50$  см.

Ответ:  $F = 4,03$  мН.

10. Тонкое кольцо радиусом  $R = 10$  см несет равномерно распределенный заряд  $q = 0,1$  мкКл. На перпендикуляре к плоскости кольца, восставленном из его середины, находится точечный заряд  $Q = 10$  нКл. Определите силу  $F$ , действующую на точечный заряд  $Q$  со стороны заряженного кольца, если он удален от центра кольца на  $l = 20$  см.

Ответ:  $F = 0,16$  мН.

11. По тонкому кольцу радиусом  $R = 10$  см равномерно распределен заряд с линейной плотностью  $\tau = 1$  нКл/м. В центре кольца находится заряд  $Q = 0,4$  мкКл. Определить силу  $F$ , растягивающую кольцо. Взаимодействием зарядов кольца пренебречь.

Ответ:  $F = 4,03$  мН.

## 1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

### Основные формулы

Закон взаимодействия двух неподвижных точечных электрических зарядов в вакууме был установлен опытным путем. Однако оставался нерешенным такой вопрос: как осуществляется это взаимодействие?

В соответствии с современной теорией близкодействия, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждый заряд создает в окружающем пространстве *электрическое поле*. Поле первого заряда действует с некоторой силой на второй заряд и наоборот.

Главное свойство электрического поля – действие на электрические заряды. Таким образом, взаимодействие заряженных тел осуществляется через электрические поля, их окружающие.

Для количественного определения электрического поля вводится **силовая** характеристика, называемая *напряженностью*.

Напряженность  $\vec{E}$  в данной точке электрического поля – векторная физическая величина, численно равная силе, действующей со стороны электрического поля на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q},$$

где  $q$  – заряд, помещенный в данную точку поля;  $\vec{F}$  – сила, действующая на заряд  $q$  со стороны поля.

Сила, действующая на точечный заряд  $q$ , помещенный в электрическом поле,

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

Электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов называется *электростатическим*.

Поток вектора напряженности электростатического поля:

а) сквозь произвольную поверхность  $S$ , помещенную в неоднородное поле,

$$\Phi_E = \int_S E \cos \alpha dS, \text{ или } \Phi_E = \int_S E_n dS,$$

где  $\alpha$  – угол между вектором напряженности  $\vec{E}$  и нормалью  $\vec{n}$  к элементу поверхности;  $dS$  – площадь элемента поверхности;  $E_n$  – проекция вектора напряженности на нормаль;

б) через плоскую поверхность, помещенную в однородное электрическое поле,

$$\Phi_E = ES \cos \alpha.$$

Поток вектора напряженности  $\vec{E}$  через замкнутую поверхность

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS,$$

где интегрирование ведется по всей поверхности.

**Теорема Остроградского – Гаусса.** Поток вектора напряженности  $\vec{E}$  электростатического поля в вакууме через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую заряды  $q_1, q_2, \dots, q_n$ ,

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i,$$

где  $\sum_{i=1}^n q_i$  – алгебраическая сумма зарядов, заключенных внутри замкнутой поверхности;  $n$  – число зарядов.

Объемная, поверхностная и линейная плотности заряда:

$$\rho = \frac{dq}{dV}; \quad \sigma = \frac{dq}{dS}; \quad \tau = \frac{dq}{dl}.$$

Напряженность электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от заряда,

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2}.$$

Напряженность электрического поля, создаваемого металлической сферой радиусом  $R$ , несущей заряд  $q$  на расстоянии  $r$  от центра сферы:

внутри сферы ( $r < R$ ) .....  $E = 0$ ;

на поверхности сферы .....  $E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R^2}$ ;

вне сферы ( $r > R$ ) .....  $E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$ .

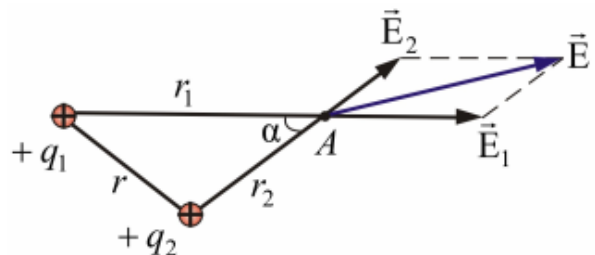
Принцип суперпозиции (наложения) электрических полей, согласно которому напряженность  $\vec{E}$  результирующего поля, созданного двумя (и более) точечными зарядами, равна векторной сумме напряженностей полей, созданных каждым зарядом в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i.$$

В случае двух электрических полей с напряженностями  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  модуль вектора напряженности результирующего поля

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ .



Напряженность поля, создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или цилиндром) на расстоянии  $r$  от ее оси

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

где  $\tau$  – линейная плотность заряда.

Напряженность поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью,

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0},$$

где  $\sigma$  – поверхностная плотность заряда.

Напряженность поля, создаваемого двумя параллельными бесконечными равномерно и разноименно заряженными плоскостями

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}.$$

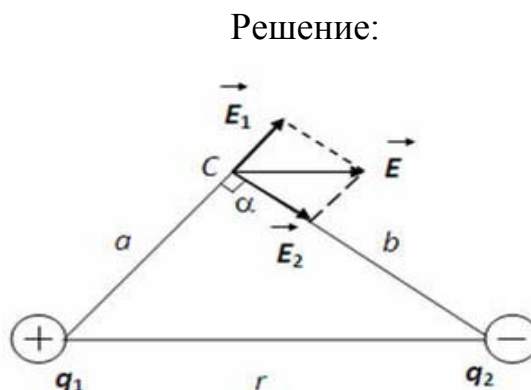
Циркуляция вектора напряженности электростатического поля вдоль замкнутого контура  $l$ ,

$$\int_l \vec{E}d\vec{l} = \int_l E_l dl = 0.$$

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Расстояние между зарядами  $q_1 = 22,5$  нКл и  $q_2 = -44$  нКл равно 5 см. Определите напряженность электрического поля в точке, находящейся в 3 см от первого и в 4 см от второго заряда.

Дано:	СИ
$q_1 = 22,5$ нКл	$22,5 \cdot 10^{-9}$ Кл
$q_2 = -44$ нКл	$-44 \cdot 10^{-9}$ Кл
$a = 3$ см	0,03 м
$b = 4$ см	0,04 м
$r = 5$ см	0,05 м
<hr/>	
$E = ?$	



Согласно принципу суперпозиции электрических полей каждый заряд создает поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Поэтому напряженность  $\vec{E}$  электрического поля в искомой точке может



быть найдена как векторная сумма напряженностей  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

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

Напряженности электрического поля, создаваемого в вакууме первым и вторым зарядами, соответственно равны

$$E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\epsilon_0 a^2}; \quad E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\epsilon_0 b^2}.$$

Вектор  $\vec{E}_1$  направлен по силовой линии от заряда  $q_1$  так как  $q_1 > 0$ ; вектор  $\vec{E}_2$  направлен также по силовой линии, но к заряду  $q_2$ , так как  $q_2 < 0$ .

Модуль вектора  $\vec{E}$  найдем по формуле

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  – угол между векторами  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ .

Из рисунка видно, что  $\alpha = 90^\circ$ .  $\cos 90^\circ = 0$ , поэтому  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ .

Подставив в эту формулу выражения  $E_1$  и  $E_2$ , получаем

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\frac{q_1^2}{a^2} + \frac{q_2^2}{b^2}}.$$

Выполним расчет

$$E = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \sqrt{\frac{(22,5 \cdot 10^{-9})^2}{0,03^2} + \frac{(44 \cdot 10^{-9})^2}{0,04^2}} = 11982 \text{ В/м.}$$

Ответ:  $E = 11982 \text{ В/м.}$

креплен точечный отрицательный заряд  $q$ . В точке  $A$ , положение которой определяется расстоянием  $r$  и углом  $\alpha$  (см. рис.), модуль вектора напряженности результирующего электрического поля  $E = E_0$ . Определите угол  $\alpha$ .

Дано:

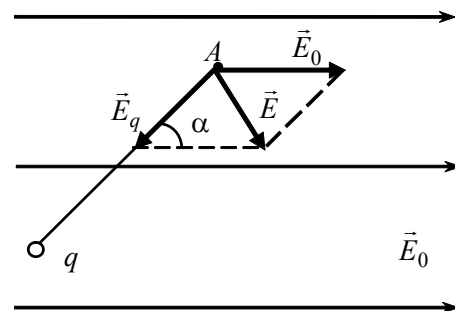
$E_0$  – модуль напряженности однородного электрического поля

$q$  – точечный отрицательный заряд

$E = E_0$

$\alpha = ?$

Решение:



Согласно принципу суперпозиции напряженность результирующего поля равна

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_q,$$

где  $\vec{E}_q$  – напряженность поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  в точке  $A$ .

$$E_q = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q|}{r^2} = k \frac{|q|}{r^2}.$$

По теореме косинусов

$$E^2 = E_0^2 + E_q^2 - 2E_0E_q \cos \alpha.$$

Учитывая, что по условию задачи  $E = E_0$ , получим для искомого угла  $\alpha$

$$\cos \alpha = \frac{kq}{2E_0r^2}, \quad \alpha = \arccos \frac{kq}{2E_0r^2}.$$

Ответ:  $\alpha = \arccos \frac{kq}{2E_0r^2}.$

**Пример 3.** Определите поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую шаровую поверхность, внутри которой находятся три точечных заряда  $q_1 = +2$  нКл,  $q_2 = -3$  нКл и  $q_3 = +5$  нКл. Рассмотреть случаи, когда система зарядов находится в вакууме и в воде.

Дано:	СИ	Решение:
$q_1 = +2$ нКл,	$+2 \cdot 10^{-9}$ Кл	В общем случае поток вектора напряженности $\Phi_E$ сквозь произвольную замкнутую поверхность $S$ равен
$q_2 = -3$ нКл,	$-3 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$q_3 = +5$ нКл	$+5 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$\Phi_E = ?$		$\Phi_E = \oint_S E_n dS,$ <p>где <math>E_n</math> – проекция вектора <math>\vec{E}</math> на нормаль <math>\vec{n}</math> к поверхности, <math>E_n = E \cos \alpha</math>.</p>

Для шаровой поверхности, в центре которой помещен точечный заряд  $q$ ,  $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$  и  $E_n = E$ . В каждой точке шаровой поверхности  $E$  – величина постоянная и определяется по формуле

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Тогда поток вектора напряженности электрического поля, созданного зарядом  $q$ , сквозь шаровую поверхность

$$\Phi_E = \oint_S E dS = E \oint_S dS = ES = E \cdot 4\pi r^2.$$

Подставляя в эту формулу выражение для  $E$ , получаем

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}.$$

На основании теоремы Остроградского – Гаусса для системы зарядов полный поток вектора напряженности сквозь замкнутую поверхность произвольной (в том числе шаровой) формы равен

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

Выполним вычисления:

а) в случае, когда заряды находятся в вакууме ( $\epsilon = 1$ ),

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} (q_1 + q_2 + q_3).$$

$$\Phi_E = \frac{(+2 - 3 + 5) \cdot 10^{-9}}{8,85 \cdot 10^{-12}} = 452 \text{ В/м.}$$

б) в случае, когда заряды находятся в воде ( $\epsilon = 81$ ),

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} (q_1 + q_2 + q_3).$$

$$\Phi_E = \frac{(+2 - 3 + 5) \cdot 10^{-9}}{81 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 5,6 \text{ В/м.}$$

Ответ: а)  $\Phi_E = 452 \text{ В/м}$ , б)  $\Phi_E = 5,6 \text{ В/м}$ .

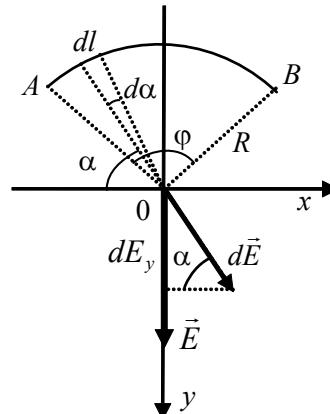
**Пример 4.** На единицу длины тонкого однородно заряженного стержня  $AB$ , имеющего форму дуги окружности радиуса  $R$  с центром в точке  $O$ , приходится заряд  $\tau$ . Найдите модуль напряженности электрического поля в точке  $O$ , если угол  $AOB$  равен  $\varphi$ .

Дано:

$R$  – радиус кривизны дуги  
 $\tau$  – линейная плотность заряда стержня  
 $\varphi$  – величина угла  $AOB$

$E$  – ?

Решение:



Построим прямоугольную систему координат так, чтобы начало координат совпадало с точкой  $O$ , а ось  $y$  была симметрично расположена относительно концов дуги  $AB$ .

Разобьем стержень на элементарные участки длиной  $dl$  с зарядом  $dq = \tau dl$ , который можно рассматривать как точечный.

Найдем напряженность поля, создаваемого зарядом этого элементарного участка стержня в точке  $O$ :

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{R^2} \frac{\vec{R}}{R} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau dl}{R^2} \frac{\vec{R}}{R},$$

где  $\vec{R}$  – радиус вектор, направленный от элемента  $dl$  к точке, в которой определяется напряженность. Напряженность результирующего поля найдем, воспользовавшись принципом суперпозиции. В силу симметрии результирующее поле будет направлено вдоль оси  $y$ .

Запишем выражение для проекции вектора  $d\vec{E}$  на ось  $y$ :

$$dE_y = \frac{\tau dl}{4\pi\epsilon_0 R^2} \sin \alpha.$$

Приведем правую часть последнего уравнения к одной переменной интегрирования – углу  $\alpha$  (учитывая, что  $dl = R d\alpha$ ):

$$dE_y = \frac{\tau \sin \alpha}{4\pi\epsilon_0 R} d\alpha.$$

Проинтегрировав левую часть полученного уравнения от 0 до  $E$ , а правую от  $\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)$  до  $\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\varphi}{2}\right)$ , найдем модуль напряженности электрического поля, создаваемого в точке  $O$  дугой  $AB$ :

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R} \sin \frac{\varphi}{2}.$$

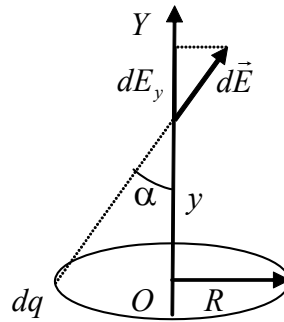
$$\text{Ответ: } E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 R} \sin \frac{\varphi}{2}.$$

**Пример 5.** Кольцо радиуса  $R$  из тонкой проволоки имеет однородно распределенный заряд  $q$ . Найдите модуль напряженности электрического поля на оси кольца как функцию расстояния  $y$  до его центра. Исследуйте  $E_y$  при  $y \gg R$ .

Дано:  
 $R$  – радиус кольца  
 $q$  – заряд кольца

$E_y = ?$

Решение:



Разобьем заряд кольца на бесконечно малые элементы с зарядами  $dq$ , которые можно рассматривать как точечные. На оси кольца выберем произвольную точку с координатой  $y$ . Напряженность поля, созданного зарядом  $dq$  в этой точке, равна  $d\vec{E}$ . Направление вектора  $d\vec{E}$  показано на рисунке, а его величина равна

$$dE = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0(R^2 + y^2)}.$$

Напряженность результирующего поля найдем, воспользовавшись принципом суперпозиции. В силу симметрии результирующее поле будет направлено вдоль оси  $y$  (см. рисунок).

Поэтому 
$$E_y = \int dE_y,$$

где 
$$dE_y = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0(R^2 + y^2)} \cos \alpha.$$

Учитывая, что  $\cos \alpha = \frac{y}{\sqrt{R^2 + y^2}}$ , получим

$$dE_y = \frac{y dq}{4\pi\epsilon_0(R^2 + y^2)^{3/2}}.$$

Суммируя вклады всех элементов кольца, найдем проекцию вектора напряженности результирующего поля на ось  $y$ :

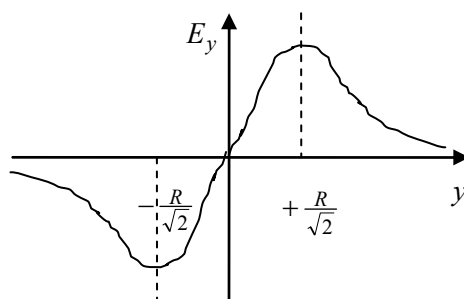
$$E_y = \frac{yq}{4\pi\epsilon_0(R^2 + y^2)^{3/2}}.$$

Рассмотрим напряженность поля на больших расстояниях  $y \gg R$ .

$$E_y = \frac{qy}{4\pi\epsilon_0|y|^3},$$

т.е. на больших расстояниях система ведет себя как точечный заряд.

График  $E_y(y)$  представлен на рисунке.



Точки, в которых напряженность поля принимает максимальные значения, имеют координаты  $y = \pm R / \sqrt{2}$ .

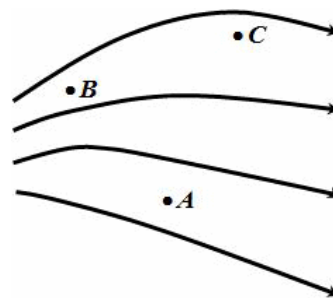
Ответ: 
$$E_y = \frac{yq}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + y^2)^{3/2}}$$

### Тесты

1. Силовой характеристикой электрического поля является...

- 1) напряженность
- 2) работа
- 3) поток вектора напряженности
- 4) потенциал

2. Задана картина линий напряженности электрического поля (см. рисунок). В какой точке  $A$ ,  $B$  или  $C$  – сила, действующая на внесенный в поле пробный заряд, будет наибольшей?



- 1)  $A$ ;
- 2)  $B$ ;
- 3)  $C$ ;
- 4) во всех точках сила одинакова по величине.

3. Электрический заряд  $q$  создает электрическое поле, напряженность которого в точке, расположенной на расстоянии  $r$  от него, равна  $E$ . Чему равна напряженность электрического поля, созданного зарядом  $3q$ , на расстоянии  $3r$  от этого заряда?

- 1)  $3E$ ;
- 2)  $E$ ;
- 3)  $1/9E$ ;
- 4)  $1/3E$ ;

4. Установите соответствие между источником электростатического поля и формулой, позволяющей вычислить напряженность поля в некоторой точке.

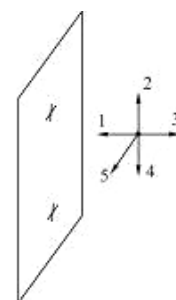
- 1) Точечный заряд
- 2) Равномерно заряженная длинная нить
- 3) Равномерно заряженная бесконечная плоскость

$$1) E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$$

$$2) E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\epsilon r^2}$$

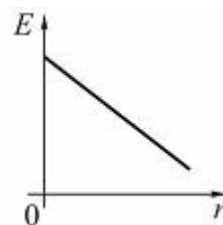
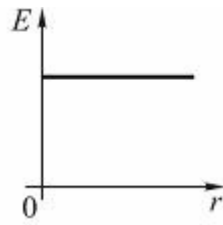
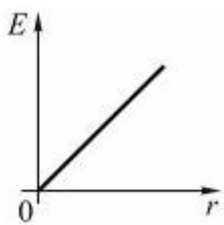
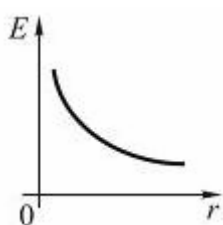
$$3) E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

5. Электрическое поле создано бесконечно протяженной положительно заряженной непроводящей плоскостью. Направление напряженности электрического поля показывает вектор ...



- 1) 1;      2) 2;      3) 3;      4) 4;      5) 5.

6. Величина напряженности электростатического поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью, в зависимости от расстояния  $r$  от нее верно представлена на рисунке ...



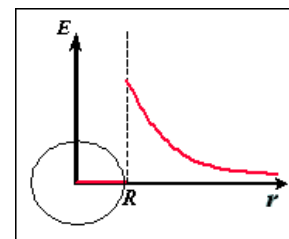
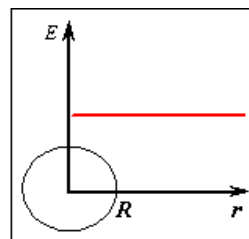
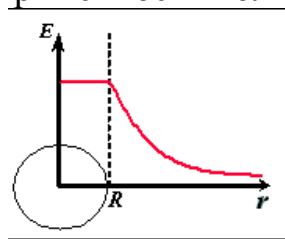
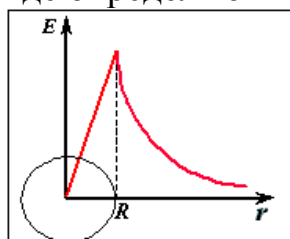
1)

2)

3)

4)

7. Укажите, на каком графике правильно показана зависимость напряженности электростатического поля  $E$  от расстояния  $r$  между центром равномерно заряженной проводящей сферы радиусом  $R$  и точкой, где определяют напряженность поля.



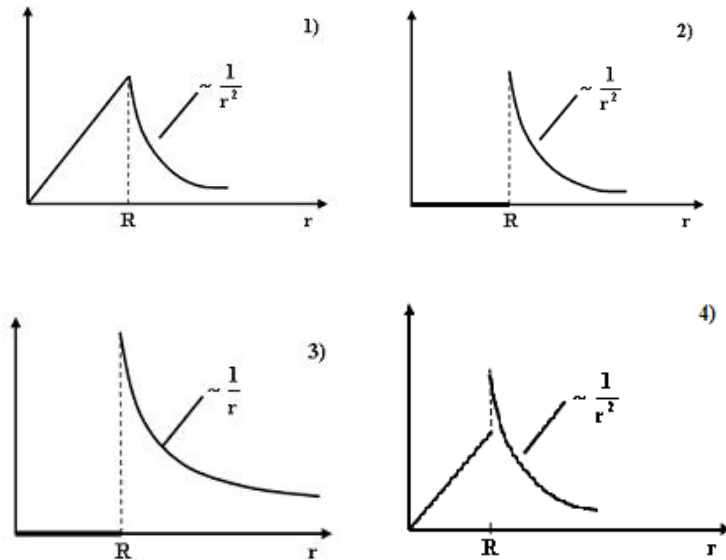
1)

2)

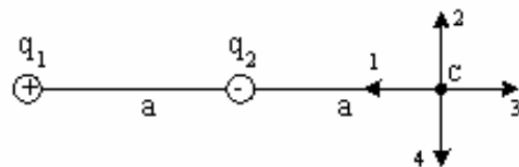
3)

4)

8. На рисунках представлены графики зависимости напряженности поля  $E(r)$  для различных распределений заряда. График зависимости  $E(r)$  для заряженной металлической сферы радиуса  $R$  показан на рисунке ...

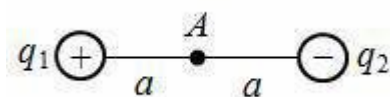


9. Электрическое поле создано одинаковыми по величине точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ . Если  $q_1 = +q$ ,  $q_2 = -q$ , а расстояние между зарядами и от заряда  $q_2$  до точки  $C$  равно  $a$ , то вектор напряженности электрического поля в точке  $C$  ориентирован в направлении ...



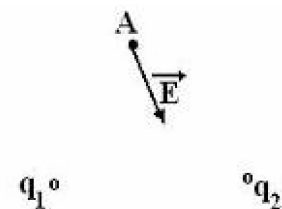
- 1) 1;                      2) 2;                      3) 3;                      4) 4.

10. Укажите направление напряженности результирующего поля в точке  $A$  (см. рисунок). Поле образовано двумя разноименными одинаковыми по величине зарядами.



- 1) вправо;    2) влево;    3) вниз;    4) вверх;    5) равна нулю.

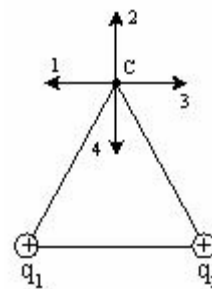
11. На рисунке показано направление вектора  $\vec{E}$  напряженности суммарного электрического поля точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  в точке  $A$ . При этом для зарядов  $q_1$  и  $q_2$  справедливо соотношение...



- 1)  $q_1 < 0, q_2 < 0$ ;    2)  $q_1 > 0, q_2 > 0$ ;    3)  $q_1 > 0, q_2 < 0$ ;    4)  $q_1 < 0, q_2 > 0$ .

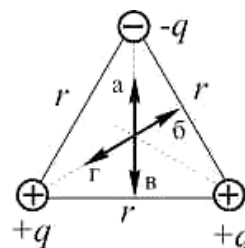


12. Электростатическое поле создано одинаковыми по величине точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ . Если  $q_1 = q_2 = +q$ , а расстояние между зарядами и от зарядов до точки  $C$  равно  $r$ , то вектор напряженности поля в точке  $C$  ориентирован в направлении...



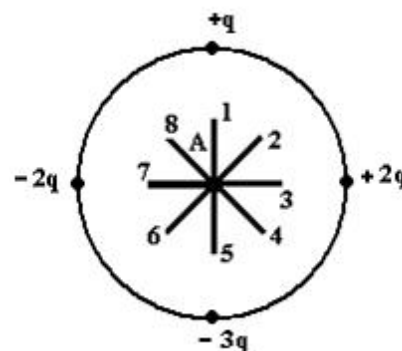
- 1) 1;      2) 2;      3) 3;      4) 4.

13. Вектор напряженности результирующего электростатического поля, создаваемого одинаковыми по величине точечными зарядами в центре равностороннего треугольника, имеет направление ...



- 1) *a*;      2) *b*;      3) *в*;      4) *г*.

14. Электростатическое поле создано системой точечных зарядов. Вектор напряженности поля в точке  $A$  ориентирован в направлении ...



15. Каждый из четырех одинаковых по модулю точечных зарядов, расположенных в вершинах квадрата, создает в точке пересечения диагоналей электрическое поле, напряженность которого равна  $E$ . Напряженность результирующего поля в этой точке равна...



- 1) 0;      2)  $4\sqrt{2}E$ ;      3)  $4E$ ;      4)  $2\sqrt{2}E$ .

16. Чему равен поток вектора напряженности электростатического поля через сферическую поверхность, охватывающую точечные заряды  $q_1 = +5$  нКл и  $q_2 = -2$  нКл.

- 1) 339 В·м;      2) 376 В·м;      3) 791 В·м;      4) 565 В·м.

17. Поток вектора электрической индукции через замкнутую поверхность, внутри которой находятся заряды, равен...

- 1) сумме связанных электрических зарядов внутри этой поверхности;  
2) сумме свободных электрических зарядов внутри этой поверхности;

- 3) ЭДС контура, проведенного внутри этой поверхности;
- 4) нулю.

18. Если поток вектора напряженности электростатического поля через сферическую поверхность радиуса  $R$ , окружающую точечный заряд  $q$ , равен  $\Phi_1$ , то величина потока  $\Phi_2$  через сферическую поверхность радиусом  $R/2$ , окружающую этот заряд, равна...

- 1)  $\Phi_2 = \Phi_1$ ;
- 2)  $\Phi_2 = 4\Phi_1$ ;
- 3)  $\Phi_2 = \Phi_1 / 4$ ;
- 4)  $\Phi_2 = 2\Phi_1$ .

19. Точечный заряд  $+q$  находится в центре сферической поверхности. Если добавить заряд  $+q$  за пределами сферы, то поток вектора напряженности электростатического поля  $E$  через поверхность сферы...

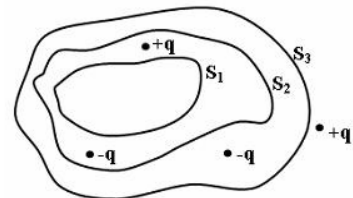
- 1) увеличится;
- 2) уменьшится;
- 3) не изменится.

20. Точечный заряд  $+q$  находится в центре сферической поверхности. Если заряд сместить из центра сферы, оставляя его внутри нее, то поток вектора напряженности электростатического поля  $E$  через поверхность сферы...

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

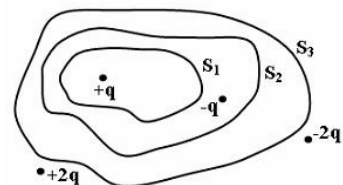
21. Дана система точечных зарядов в вакууме и замкнутые поверхности  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ . Поток вектора напряженности электростатического поля отличен от нуля через...

- 1) поверхности  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ ;
- 2) поверхность  $S_2$ ;
- 3) поверхности  $S_2$  и  $S_3$ ;
- 4) поверхность  $S_3$ .



22. Дана система точечных зарядов в вакууме и замкнутые поверхности  $S_1$ ,  $S_2$  и  $S_3$ . Поток вектора напряженности электростатического поля отличен от нуля через...

- 1) поверхности  $S_2$  и  $S_3$ ;
- 2) поверхность  $S_2$ ;
- 3) поверхность  $S_1$ ;
- 4) поверхность  $S_3$ .



23. В центре сферы радиуса 1 м находится точечный заряд  $2 \cdot 10^{-9}$  Кл. Вычислите поток вектора напряженности электрического поля через шаровой сегмент площадью  $1 \text{ м}^2$ .

1) 18;

2) 9;

3) 72;

4) 36.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Электрон движется по направлению силовых линий однородного поля напряженностью  $2,4 \text{ В/м}$ . Какое расстояние он пролетит в вакууме до полной остановки, если его начальная скорость  $2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ ? Сколько времени будет длиться полет?

Ответ:  $t = 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ;  $S = 4,7 \text{ м}$ .

2. Расстояние  $d$  между двумя точечными зарядами  $q_1 = +8 \text{ нКл}$  и  $q_2 = -5,3 \text{ нКл}$  равно  $40 \text{ см}$ . Вычислите напряженность электрического поля в точке, лежащей посередине между зарядами.

Ответ:  $E = 2,99 \text{ кВ/м}$ .

3. Электрическое поле создано двумя точечными зарядами  $q_1 = +10 \text{ нКл}$  и  $q_2 = -20 \text{ нКл}$ , находящимися на расстоянии  $d = 20 \text{ см}$  друг от друга. Определите напряженность поля в точке, удаленной от первого заряда на  $r_1 = 30 \text{ см}$  и от второго на  $r_2 = 50 \text{ см}$ .

Ответ:  $E = 280 \text{ В/м}$ .

4. Расстояние  $d$  между двумя точечными положительными зарядами  $q_1 = +9q$  и  $q_2 = +q$  равно  $8 \text{ см}$ . На каком расстоянии от первого заряда находится точка, в которой напряженность поля зарядов равна нулю?

Ответ:  $r = 6 \text{ см}$ .

5. Два точечных заряда  $q_1 = +2q$  и  $q_2 = -q$  находятся на расстоянии  $d$  друг от друга. Найти положение точки на прямой, проходящей через эти заряды, напряженность поля зарядов в которой равна нулю.

Ответ: за отрицательным зарядом на расстоянии  $r_1 = d(\sqrt{2} + 1)$ .

6. Определите напряженность электрического поля, создаваемого тонкой нитью длиной  $10 \text{ см}$ , в точке  $A$ , расположенной на линии, проходящей вдоль нити, на расстоянии  $20 \text{ см}$  от её конца. Линейная плотность заряда нити  $\tau = -10^{-12} \text{ Кл/м}$ .

Ответ:  $E = -0,015 \text{ В/м}$ .

7. Используя теорему Гаусса, определите поверхностную плотность заряда бесконечной равномерно заряженной плоскости, если напряженность поля, создаваемого плоскостью,  $8 \text{ В/м}$ , а заряд плоскости положительный.

Ответ:  $\sigma = 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/м}^2$ .

8. Определите линейную плотность заряда положительно заряженной тонкой бесконечной нити, если напряженность электрического поля, созданного этой нитью на расстоянии  $10 \text{ см}$  от нее, равна  $10 \text{ В/м}$ .

Ответ:  $\tau = 5,6 \cdot 10^{-11} \text{ Кл/м}$ .

9. Электрическое поле создается тонкой бесконечно длинной нитью, равномерно заряженной с линейной плотностью заряда  $10^{-10} \text{ Кл/м}$ . Определите поток вектора напряженности через цилиндрическую поверхность длиной  $2 \text{ м}$ , ось которой совпадает с нитью.

Ответ:  $\Phi_E = 22,6 \text{ В}\cdot\text{м}$ .

10. Полусфера несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью  $\sigma = 1 \text{ нКл/м}^2$ . Вычислите напряженность электрического поля в геометрическом центре полусферы.

Ответ:  $E = 28,3 \text{ В/м}$ .

11. В центре металлической полой сферы, радиус которой  $0,04 \text{ м}$ , расположен точечный заряд  $10 \text{ нКл}$ . Заряд  $40 \text{ нКл}$  равномерно распределен по поверхности сферы. Определите напряженность поля в точках, удаленных от центра сферы на расстояние: 1)  $2 \text{ см}$ ; 2)  $8 \text{ см}$ .

Ответ: 1)  $E = 3,08 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; 2)  $E = 3,08 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ .

12. Расстояние между двумя бесконечно длинными параллельными металлическими нитями, заряженными одноименно с линейной плотностью  $6 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}$ , равно  $5 \text{ см}$ . Найдите напряженность поля в точке, удаленной на  $5 \text{ см}$  от каждой нити.

Ответ:  $E = 3,71 \cdot 10^7 \text{ В/м}$ .

13. Две параллельно расположенные плоскости заряжены – одна с поверхностной плотностью  $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$ , другая –  $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$ . Определите напряженность поля между плоскостями.

Ответ:  $E = 5,6 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ .

14. Бесконечная плоскость несет равномерно распределенный заряд с поверхностной плотностью  $\sigma = 1 \text{ нКл/м}^2$ . На некотором расстоянии от плоскости параллельно ей расположен круг радиусом  $10 \text{ см}$ . Вычислите поток вектора напряженности через этот круг.

Ответ:  $\Phi_E = 12,84 \cdot 10^3 \text{ В}\cdot\text{м}$ .

### 1.3. ПОТЕНЦИАЛ. ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ. РАБОТА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДА В ПОЛЕ

**Потенциал**  $\varphi$  электростатического поля в данной точке – это скалярная физическая величина, равная потенциальной энергии, которой обладает единичный положительный заряд, помещенный в эту точку.

$$\varphi = \frac{\Pi}{q},$$

где  $\Pi$  – потенциальная энергия заряда  $q$ , внесенного в данную точку поля.

За единицу потенциала в СИ принимают *вольт* (1 В). 1 В равен потенциалу точки поля, в которой заряд 1 Кл обладает потенциальной энергией 1 Дж.

Потенциал является *энергетической характеристикой электростатического поля*.

Потенциал электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $q$  на расстоянии  $r$  от заряда,

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{\varepsilon r}.$$

Потенциал электрического поля, создаваемого металлической сферой радиусом  $R$ , несущей заряд  $q$  на расстоянии  $r$  от центра сферы:

внутри сферы ( $r < R$ ) .....  $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R}$ ;

на поверхности сферы .....  $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R}$ ;

вне сферы ( $r > R$ ) .....  $\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}$ ,

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость однородного безграничного диэлектрика, окружающего сферу.

Если электрическое поле создано системой зарядов, то, по **принципу суперпозиции** потенциал в данной точке результирующего поля равен алгебраической сумме потенциалов полей, созданных отдельными зарядами.

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i.$$

Энергия  $W$  взаимодействия системы точечных зарядов  $q_1, q_2, \dots, q_n$  определяется работой, которую эта система зарядов может совершить при

удалении их друг относительно друга в бесконечность, и выражается формулой

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i,$$

где  $\varphi_i$  – потенциал поля, создаваемого всеми  $n-1$  зарядами (за исключением  $i$ -го) в точке, где расположен заряд  $q_i$ .

Потенциал связан с напряженностью электрического поля соотношением

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi.$$

В случае однородного электрического поля, т.е. поля, напряженность которого в каждой точке его одинакова как по модулю, так и по направлению,

$$E = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2)}{d},$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы точек двух эквипотенциальных поверхностей;  $d$  – расстояние между этими поверхностями вдоль электрической силовой линии.

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении точечного заряда  $q$  из одной точки поля, имеющей потенциал  $\varphi_1$ , в другую, имеющую потенциал  $\varphi_2$ ,

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2), \quad \text{или} \quad A = q \int_l E_l dl,$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов между точками 1 и 2 поля;  $E_l$  – проекция вектора напряженности  $\vec{E}$  на направление перемещения;  $dl$  – перемещение.

$$(\varphi_1 - \varphi_2) = \frac{A}{q}.$$

**Разность потенциалов** между точками 1 и 2 численно равна работе сил электростатического поля при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Электростатическое поле создано равномерно заряженной сферической поверхностью радиуса  $R$ . Заряд сферы  $q$ . Найдите разность потенциалов между двумя точками, лежащими на расстоянии  $r_1$  и  $r_2$  от

центра заряженной сферической поверхности. Запишите выражение потенциала для точек внутри и вне и постройте график  $\varphi(r)$ .

Дано:

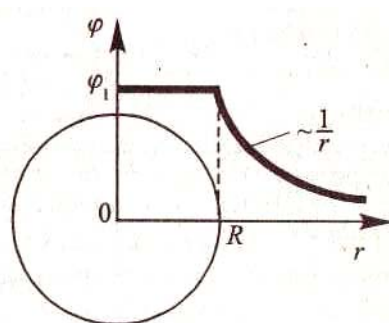
$q$  – заряд сферы

$R$  – радиус сферы

$\varphi_1 - \varphi_2 = ?$

$\varphi = ?$

Решение



Из условия симметрии следует, что силовые линии электростатического поля заряженной сферы направлены радиально. По тем же причинам модуль вектора напряженности  $\vec{E}$  должен быть одинаковым во всех точках, лежащих на одном и том же расстоянии от центра заряженной сферы.

Если применить теорему Гаусса для определения  $\vec{E}$ , то получим, что электростатическое поле вне заряженной сферической поверхности эквивалентно полю точечного заряда, равного заряду сферы и расположенного в ее центре, и вычисляется по формуле

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}.$$

Внутри сферы поле отсутствует. В этом случае уравнение  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$  имеет вид

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}.$$

Из последнего уравнения следует, что

$$d\varphi = -E dr,$$

откуда

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

или

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2}.$$

Потенциал заряженной сферической поверхности

$$\varphi_n = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R} \quad (r_1 = R, r_2 = \infty).$$

Потенциал вне сферы вычисляется по формуле

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (r > R).$$

На рисунке изображен график  $\varphi(r)$  для заряженной сферической поверхности. Вне сферы потенциал поля убывает пропорционально  $\frac{1}{r}$ , где  $r$  – расстояние от центра заряженной сферы до точки, в которой определяют потенциал. Внутри потенциал всех точек одинаков и равен потенциалу заряженной поверхности сферы.

$$\text{Ответ: } \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2}, \quad \varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$$

**Пример 2.** Заряд  $q_1 = -1$  нКл переместился в поле заряда  $q_2 = +1,5$  нКл из точки с потенциалом  $\varphi_1 = 100$  В в точку с потенциалом  $\varphi_2 = 600$  В. Определите работу сил поля и расстояние между точками.

Дано:	СИ	Решение
$q_1 = -1$ нКл	$10^{-9}$ Кл	Потенциал $\varphi$ поля, созданного точечным зарядом $q$ , равен
$q_2 = +1,5$ нКл	$1,5 \cdot 10^{-9}$ Кл	
$\varphi_1 = 100$ В		
$\varphi_2 = 600$ В		
$A - ?$		$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r},$
$\Delta r - ?$		где $r$ – расстояние от заряда до данной точки поля.

Потенциал точки 1 поля  $\varphi_1 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1}$ , откуда

$$r_1 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \varphi_1}; \quad r_1 = \frac{1,5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 100} = 13,5 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Потенциал точки 2 поля  $\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2}$ , откуда  $r_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 \varphi_2}$ ;

$$r_2 = \frac{1,5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 600} = 2,25 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Расстояние между точками 1 и 2 поля  $\Delta r = r_1 - r_2 = 11,25 \cdot 10^{-2}$  м.



Работа сил поля при перемещении заряда  $q_1$  из точки 1 в точку 2 поля

$$A = q_1(\varphi_1 - \varphi_2).$$

$$A = 10^{-9} \cdot (100 - 600) = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$$

Ответ:  $\Delta r = 11,25 \cdot 10^{-2} \text{ м}; A = 5 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$

**Пример 3.** Электрическое поле образовано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии  $d = 2 \text{ см}$  друг от друга. К пластинам приложена разность потенциалов  $U = 120 \text{ В}$ . Какую скорость  $v$  получит электрон под действием поля, пройдя по линии напряженности расстояние  $\Delta r = 3 \text{ мм}$  ?

Дано:	СИ
$d = 2 \text{ см}$	$0,02 \text{ м}$
$U = 120 \text{ В}$	
$\Delta r = 3 \text{ мм}$	$0,003 \text{ м}$
$v = ?$	

**Решение**  
 Для того, чтобы сообщить электрону кинетическую энергию  $W_k = \frac{mv^2}{2}$ , силы электрического поля должны совершить работу  $A = e\Delta\varphi$ , где  $\Delta\varphi$  – разность потенциалов между точками, находящимися на расстоянии  $\Delta r$ .

Напряженность поля между пластинами  $E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}$ , откуда  $\Delta\varphi = E\Delta r$ .

Тогда работа сил поля  $A = eE\Delta r$  или, учитывая, что  $E = \frac{U}{d}$ ,  $A = \frac{eU\Delta r}{d}$ .

Поскольку  $A = W_k$ , то  $\frac{eU\Delta r}{d} = \frac{mv^2}{2}$ , откуда  $v = \sqrt{\frac{2eU\Delta r}{md}}$ .

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 120 \cdot 0,003}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,02}} = 2,53 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$$

Ответ:  $v = 2,53 \cdot 10^6 \text{ м/с.}$

**Пример 4.** Заряд  $q = 1 \text{ нКл}$  переносится в воздухе из точки, находящейся на расстоянии  $r_0 = 1 \text{ м}$  от бесконечно длинной равномерно заряженной нити, в точку на расстоянии  $r_1 = 10 \text{ см}$  от нее. Определите работу, совершаемую против сил поля, если линейная плотность заряда нити  $\tau = 1 \text{ мкКл/м}$ . Какая работа совершается на последних  $r_2 = 20 \text{ см}$  пути?

Дано:	СИ	Решение
$q = 1 \text{ нКл}$	$10^{-9} \text{ Кл}$	<p>Работа внешней силы по перемещению заряда <math>q</math> из точки поля с потенциалом <math>\varphi_0</math> в точку с потенциалом <math>\varphi_1</math> равна</p> $A_1 = q(\varphi_0 - \varphi_1).$ <p>Бесконечная равномерно заряженная нить с линейной плотностью заряда <math>\tau</math> создает аксиально симметричное поле напряженностью</p> $E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r}.$
$r_0 = 1 \text{ м}$		
$r_1 = 10 \text{ см}$	$0,1 \text{ м}$	
$\tau = 1 \text{ мкКл/м}$	$10^{-6} \text{ Кл/м}$	
$r_2 = 20 \text{ см}$	$0,2 \text{ м}$	
$A_1 - ?$		
$A_2 - ?$		

Напряженность и потенциал этого поля связаны соотношением

$$E = -\frac{d\varphi}{dr}, \quad \text{откуда } d\varphi = -E dr.$$

Разность потенциалов точек поля на расстоянии  $r_0$  и  $r_1$  от нити

$$\varphi_0 - \varphi_1 = -\int_{r_1}^{r_0} E dr = -\frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_0} \frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_0};$$

$$\varphi_0 - \varphi_1 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_0}; \quad \varphi_0 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_0}.$$

Подставляя в формулу работы выражение для разности потенциалов, определим работу, совершаемую внешними силами по перемещению заряда из точки, находящейся на расстоянии 1 м, до точки, расположенной на расстоянии 0,1 м от нити:

$$A_1 = \frac{q\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_1}{r_0};$$

$$A_1 = \frac{10^{-9} \cdot 10^{-6} \cdot \ln 10}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Работа по перемещению заряда на последних 20 см пути равна

$$A_2 = \frac{Q\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \ln \frac{r_2}{r_0};$$

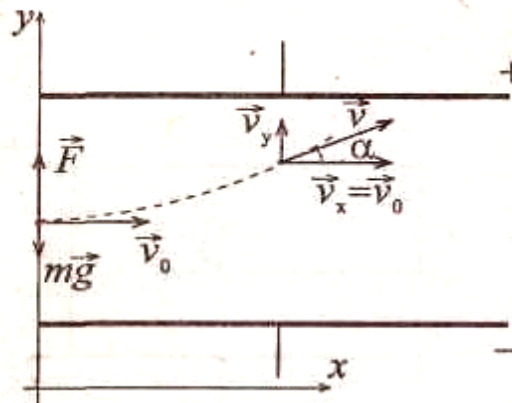
$$A_2 = \frac{10^{-9} \cdot 10^{-6} \cdot \ln 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 1,24 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Ответ:  $A_1 = 4,1 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ ,  $A_2 = 1,24 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ .

**Пример 5.** Электрон влетает с некоторой скоростью в плоский горизонтально расположенный конденсатор параллельно пластинам на равном расстоянии от них. Напряженность поля в конденсаторе  $E = 100$  В/м, расстояние между пластинами  $d = 4$  см. Через какое время  $t$  после того, как электрон влетел в конденсатор, он попадет на одну из пластин? На каком расстоянии  $S$  от начала конденсатора электрон попадет на пластину, если он ускорен разностью потенциалов  $U = 60$  В?

Дано:	СИ
$E = 100$ В/м	
$d = 4$ см	0,04 м
$U = 60$ В	
$t - ?$ $S - ?$	

### Решение



Вдоль горизонтальной оси электрон движется равномерно со скоростью  $\vec{v}_x = \vec{v}_0$ , т.к. вдоль оси  $x$  на него не действуют силы. При равномерном движении координата  $x$  изменяется со временем по закону  $x = v_0 t$ .

Вдоль оси  $y$  на электрон действуют две силы: сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила электростатического поля  $\vec{F} = e\vec{E}$ . Величина силы тяжести  $mg = (9,11 \cdot 10^{-31} \cdot 9,8)$  Н на тридцать порядков меньше величины электростатической силы  $F = (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^2)$  Н, поэтому ею можно пренебречь.

Под действием электростатической силы электрон движется вдоль оси  $y$  равноускоренно, а координата  $y$  изменяется со временем по закону

$$y = \frac{at^2}{2} = \frac{Ft^2}{2m} = \frac{eEt^2}{2m}.$$

При  $y = \frac{d}{2}$  время движения электрона  $t = \sqrt{\frac{dm}{eE}}$ .

$$t = \sqrt{\frac{0,04 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 100}} = 48 \cdot 10^{-9} \text{ с}.$$

Пройдя разность потенциалов  $U$ , электрон за счет работы  $A$  сил электростатического поля приобретает кинетическую энергию, т.е.

$$A = eU = \frac{mv_0^2}{2}, \text{ откуда } v_0 = \sqrt{\frac{2eU}{m}}.$$

Через промежуток времени, равный  $t$ , он упадет на пластину на расстоянии  $S = v_0 t = t \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ .

$$S = 48 \cdot 10^{-9} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 60}{9,1 \cdot 10^{-31}}} = 0,22 \text{ м.}$$

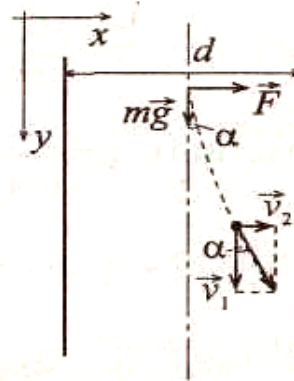
Ответ:  $t = 48 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ ,  $S = 0,22 \text{ м}$ .

**Пример 6.** Между двумя вертикальными пластинами на одинаковом расстоянии от них падает пылинка. Вследствие сопротивления воздуха скорость пылинки постоянна и равна  $v_1 = 2 \text{ см/с}$ . Через какое время  $t$  после подачи на пластины разности потенциалов  $U = 3 \text{ кВ}$  пылинка достигнет одной из пластин? Расстояние между пластинами  $d = 2 \text{ см}$ , масса пылинки  $m = 2 \cdot 10^{-9} \text{ г}$ , заряд ее  $q = 6,5 \cdot 10^{-17} \text{ Кл}$ .

Дано:	СИ
$v_1 = 2 \text{ см/с}$	0,02 м/с
$U = 3 \text{ кВ}$	3000 В
$d = 2 \text{ см}$	0,02 м
$m = 2 \cdot 10^{-9} \text{ г}$	$2 \cdot 10^{-12} \text{ кг}$
$q = 6,5 \cdot 10^{-17} \text{ Кл}$	

$t - ?$

Решение



В отсутствие электрического поля на пылинку действуют сила тяжести  $m\vec{g}$  и сила сопротивления воздуха  $6\pi\eta r\vec{v}_1$ . Так как скорость пылинки постоянна, то

$$mg = 6\pi\eta r v_1.$$

При наличии электрического поля на пылинку действует горизонтальная сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ , которая сообщает ей ускорение, но из-за сопротивления воздуха в горизонтальном направлении также устанавливается движение с некоторой постоянной скоростью  $v_2$ , причем

$$qE = 6\pi\eta r v_2.$$

Из рисунка видно, что

$$\text{tg } \alpha = \frac{v_1}{v_2} = \frac{qE}{mg}.$$

Кроме того, отношение  $\frac{v_2}{v_1} = 0,5 \frac{d}{l}$ , откуда  $l = 0,5 v_1 \frac{d}{v_2} = 0,5 mg \frac{d}{qE} = 0,02$  м, тогда  $v_2 = \frac{v_1 d}{2l} = 0,01$  м/с.

Искомое время движения пылинки найдем по формуле  $t = \frac{l}{v_1}$ .

$$t = \frac{0,02}{0,02} = 1 \text{ с.}$$

Ответ:  $t = 1$  с.

### Тесты

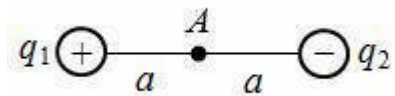
1. Электрический потенциал – это ...

- 1) величина, характеризующая магнитные свойства поля;
- 2) энергетическая характеристика электростатического поля;
- 3) силовая характеристика электростатического поля;
- 4) скалярная величина, численно равная кинетической энергии электрона.

2. В некоторой точке поля, созданного точечным зарядом, потенциал равен 4 В. Расстояние между точкой и зарядом уменьшили в 2 раза, при этом потенциал стал равным...

- 1) 8 В;                      2) 16 В;                      3) 2 В;                      4) 1 В.

3. Электрическое поле образовано двумя разноименными одинаковыми по величине зарядами  $q_1 = +q$  и  $q_2 = -q$ . Потенциал в точке А равен....



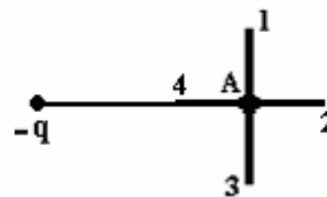
- 1)  $\varphi = 0$ ;
- 2)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{a}$ ;
- 3)  $\varphi = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q}{a}$ ;
- 4)  $\varphi = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{q}{a}$ .

4. Электрический заряд  $q$  на расстоянии  $r$  от точечного электрического заряда  $Q$  обладает потенциальной энергией  $W$ . Какой потенциальной энергией будет обладать электрический заряд  $3q$  на расстоянии  $r$  от заряда  $Q$ ?

- 1)  $3W$ ;                      2)  $9W$ ;                      3)  $1/9W$ ;                      4)  $1/3W$ .

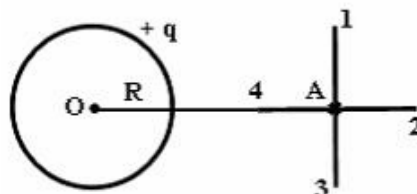
5. Поле создано точечным зарядом  $-q$ . Укажите направление градиента потенциала в точке А.

- 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4.



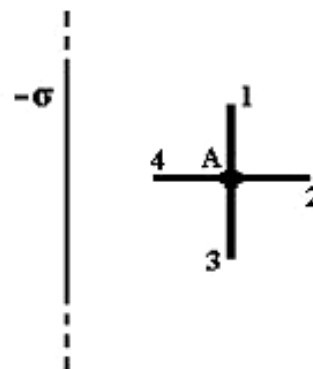
6. Поле создано равномерно заряженной сферической поверхностью с точечным зарядом  $+q$ . Укажите направление градиента потенциала в точке А.

- 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4.

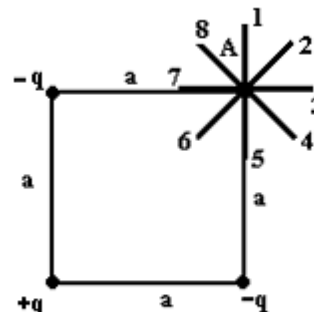


7. Поле создано бесконечной равномерно заряженной плоскостью с поверхностной плотностью заряда  $-\sigma$ . Укажите направление градиента потенциала в точке А.

- 1) 1; 2) 2; 3) 3; 4) 4.



8. Электростатическое поле создано системой точечных зарядов  $-q$ ,  $+q$  и  $-q$ . В каком направлении ориентирован градиент потенциала поля в точке А (см. рисунок)?



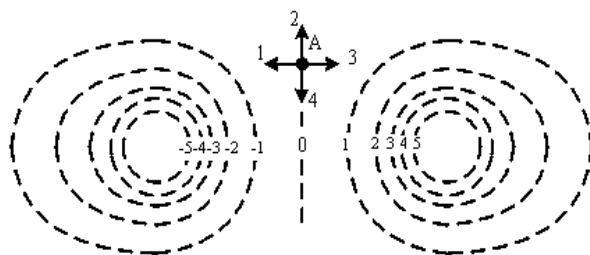
9. Каждый из четырех одинаковых по модулю точечных зарядов (см. рисунок), расположенных в вершинах квадрата, создает в точке пересечения диагоналей электрическое поле, напряженность которого равна  $E$ .

Градиент потенциала поля в этой точке равен \_\_\_\_\_ и направлен горизонтально...



- 1)  $4E$ , влево; 2)  $4\sqrt{2}E$ , влево; 3)  $4E$ , вправо; 4)  $2\sqrt{2}E$ , вправо.

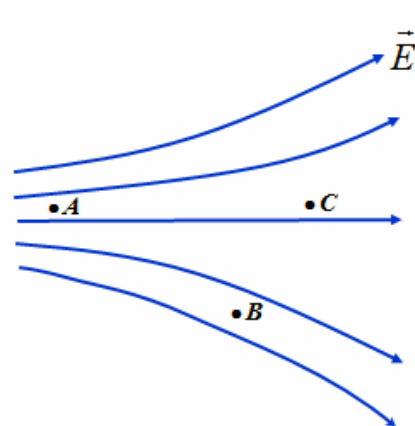
10. На рисунке показаны эквипотенциальные линии системы зарядов и значения потенциала на них.



Вектор напряженности электрического поля в точке A ориентирован в направлении...

- 1) 1;                      2) 2;                      3) 3;                      4) 4.

11. На рисунке изображены силовые линии электростатического поля. Укажите верное соотношение для потенциала поля в точках A, B и C.

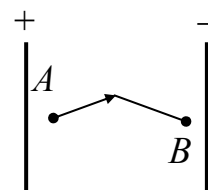


- 1)  $\varphi_A < \varphi_B < \varphi_C$ ;  
 2)  $\varphi_A = \varphi_C > \varphi_B$ ;  
 3)  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$ ;  
 4)  $\varphi_A = \varphi_C < \varphi_B$ ;  
 5)  $\varphi_A > \varphi_B > \varphi_C$ .

12. Два проводника заряжены до потенциалов 34 В и  $-16$  В. Заряд  $100$  нКл нужно перенести со второго проводника на первый. При этом необходимо совершить работу (в мкДж), равную ...

- 1) 5 мкДж;      2) 18 мкДж;      3)  $-18$  мкДж;      4)  $-5$  мкДж;

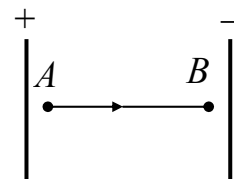
13. В электрическом поле плоского конденсатора перемещается заряд  $+q$  в направлении, указанном стрелкой.



Тогда работа сил поля на участке AB ...

- 1) отрицательна;  
 2) положительна;  
 3) равна нулю.

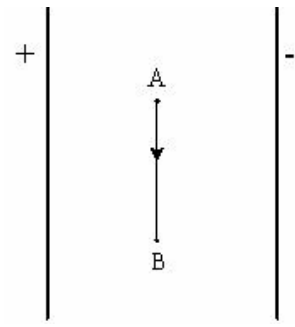
14. В электрическом поле плоского конденсатора перемещается заряд  $+q$  в направлении, указанном стрелкой.



Тогда работа сил поля на участке AB ...

- 1) отрицательна;  
 2) положительна;  
 3) равна нулю.

15. В электрическом поле плоского конденсатора перемещается заряд  $+q$  в направлении, указанном стрелкой.



Тогда работа сил поля на участке  $AB$  ...

- 1) отрицательна;
- 2) положительна;
- 3) равна нулю.

16. Относительно статических электрических полей справедливы утверждения....

- 1) Электростатическое поле совершает работу над переносимым зарядом.
- 2) Электростатическое поле является вихревым.
- 3) Силовые линии поля разомкнуты.
- 4) Работа поля по перемещению заряда по замкнутому контуру *не равна* нулю.

17. Относительно статических электрических полей справедливы утверждения...

- 1) Электростатическое поле является потенциальным.
- 2) Поток вектора напряженности электростатического поля сквозь произвольную замкнутую поверхность всегда равен нулю.
- 3) Электростатическое поле действует как на неподвижные, так и на движущиеся электрические заряды.
- 4) Силовые линии поля замкнуты.

18. Электростатическое поле создается бесконечной плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью  $\sigma = 1$  нКл/м<sup>2</sup>. Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстоянии  $x_1 = 20$  см и  $x_2 = 50$  см от плоскости.

- 1) 16,9 В;                      2) 23,6 В;                      3) 9 В;                      4) 7,2 В.

19. Работа сил электрического поля при перемещении заряда  $-2$  мкКл из точки поля с потенциалом 20 В в точку с потенциалом 40 В равна...

- 1)  $-40 \cdot 10^{-6}$  Дж;                      2)  $-40$  Дж;                      3)  $40 \cdot 10^{-6}$  Дж;                      4) 40 Дж.



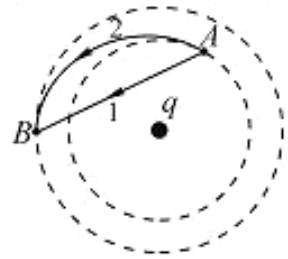
20. Поле создано точечным зарядом  $q$ . Пробный заряд перемещают из точки  $A$  в точку  $B$  по двум различным траекториям. Верным является утверждение ...

1) наибольшая работа совершается при движении по траектории 2;

2) работа в обоих случаях одинакова и равна нулю;

3) работа в обоих случаях одинакова и не равна нулю;

4) наибольшая работа совершается при движении по траектории 1.



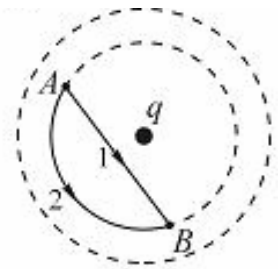
21. Поле создано точечным зарядом  $q$ . Пробный заряд перемещают из точки  $A$  в точку  $B$  по двум различным траекториям. Верным является утверждение ...

1) наибольшая работа совершается при движении по траектории 2;

2) работа в обоих случаях одинакова и равна нулю;

3) работа в обоих случаях одинакова и не равна нулю;

4) наибольшая работа совершается при движении по траектории 1.



22. В электрическом поле точечного заряда  $+q$  (см. рисунок) из точки  $A$  в точки  $B, C, D$  и  $E$  перемещают заряд  $q_0$ . Для работы по перемещению заряда  $q_0$  ( $q_0 < 0$ ) в поле заряда  $q$  справедливо соотношение...

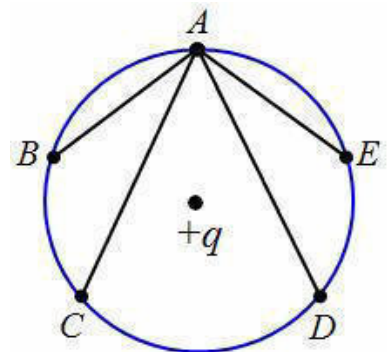
1)  $A_{AB} = A_{AC} = A_{AD} = A_{AE} = 0$ ;

2)  $A_{AB} = A_{AE} > A_{AC} = A_{AD}$ ,

3)  $A_{AB} = A_{AE} < A_{AC} = A_{AD}$ ,

4)  $A_{AB} > A_{AE} > A_{AC} > A_{AD}$ ;

5)  $A_{AB} < A_{AE} < A_{AC} < A_{AD}$ .



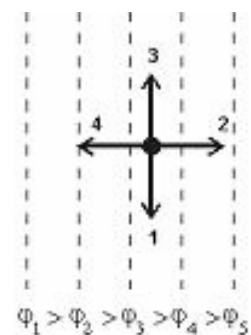
23. На рисунке показаны эквипотенциальные поверхности электростатического поля. Вектор напряженности поля имеет направление ...

1) 1

2) 2

3) 3

4) 4



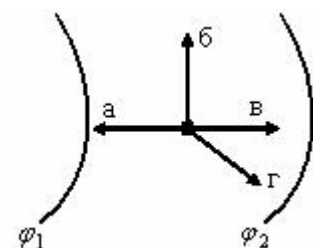
24. Протон перемещается между двумя эквипотенциальными поверхностями. Если  $\varphi_1 > \varphi_2$ , то протон движется в направлении...

1) 1;

2) 2;

3) 3;

4) 4.



### Задачи для самостоятельного решения

1. Какую работу надо совершить, чтобы заряды 1 и 2 нКл, находящиеся в воздухе на расстоянии 0,5 м, сблизить до 0,1 м?

Ответ:  $A = 1,4 \cdot 10^{-7}$  Дж.

2. Электрическое поле образовано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии 2 см друг от друга. Разность потенциалов между ними 120 В. Какую скорость получит электрон под действием поля, пройдя по силовой линии в 3 мм?

Ответ:  $v = 2,5 \cdot 10^6$  м/с.

3. Заряженная частица, пройдя ускоряющую разность потенциалов  $6 \cdot 10^5$  В, приобрела скорость 5400 км/с. Определите массу частицы, если ее заряд равен  $2e$ .

Ответ:  $m = 1,3 \cdot 10^{-26}$  кг.

4. Какая работа совершается при перенесении точечного заряда  $2 \cdot 10^{-8}$  Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии 1 см от поверхности шара радиусом 1 см с поверхностной плотностью заряда  $\sigma = 10^{-9}$  Кл/см<sup>2</sup>?

Ответ:  $A = 113$  мкДж.

5. На расстоянии  $r_1 = 4$  см от бесконечно длинной заряженной нити находится точечный заряд  $q = 0,6 \cdot 10^{-9}$  Кл. Под действием поля заряд перемещается до расстояния  $r_2 = 2$  см. При этом совершается работа  $A = 5 \cdot 10^{-6}$  Дж. Найдите линейную плотность заряда нити.

Ответ:  $\tau = 3,7$  мкКл/м.

6. Определите линейную плотность бесконечно длинной заряженной нити, если работа сил поля, создаваемого этой нитью, по перемещению заряда  $q = 1$  нКл с расстояния  $r_1 = 10$  см до расстояния  $r_2 = 5$  см в направлении, перпендикулярном нити, равна 0,1 мДж.

Ответ:  $\tau = 8 \cdot 10^{-6}$  Кл/м

7. Электрическое поле образовано положительно заряженной бесконечной нитью, линейная плотность заряда которой  $\tau = 2 \cdot 10^{-9}$  Кл/см. Какую скорость получит электрон под действием поля, приблизившись к нити с расстояния в 1 см до расстояния 0,5 см от нити?

Ответ:  $v = 296 \cdot 10^7$  м/с.

8. Около заряженной бесконечно протяженной плоскости находится точечный заряд  $q = 0,6 \cdot 10^{-9}$  Кл. Под действием поля заряд перемещается по силовой линии на расстояние 2 см. При этом совершается работа  $A = 5 \cdot 10^{-6}$  Дж. Найдите поверхностную плотность заряда на плоскости.

Ответ:  $\sigma = 6,7$  мкКл/м<sup>2</sup>.

9. В плоском горизонтально расположенном конденсаторе, расстояние между пластинами которого  $d = 1$  см, находится заряженная капелька массой  $m = 5 \cdot 10^{-11}$  г. При отсутствии электрического поля капелька вследствие сопротивления воздуха падает с некоторой постоянной скоростью. Если к пластинам конденсатора приложена разность потенциалов  $U = 600$  В, то капелька падает вдвое медленнее. Найдите заряд капельки.

Ответ:  $q = 4,1 \cdot 10^{-18}$  Кл.

10. Заряд  $-1$  нКл притянулся к бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда  $0,2$  мкКл/м<sup>2</sup>. На каком расстоянии от плоскости находился заряд, если работа сил поля по его перемещению равна  $1$  мкДж?

Ответ:  $r = 8,85 \cdot 10^{-2}$  м.

11. Между двумя вертикальными пластинами, находящимися на расстоянии 1 см друг от друга, на нити висит заряженный бузиновый шарик, масса которого равна  $0,1$  г. После того как на пластины была подана разность потенциалов  $1000$  В, нить с шариком отклонилась на угол  $10^\circ$ . Определите заряд шарика.

Ответ:  $q = 1,73$  нКл.

12. Мыльный пузырь с зарядом  $q = 2,22 \cdot 10^{-10}$  Кл находится в равновесии в поле горизонтального плоского конденсатора. Найдите разность потенциалов между пластинами конденсатора, если масса пузыря равна  $m = 0,01$  г и расстояние между пластинами  $d = 5$  см.

Ответ:  $U = 22$  кВ.

13. Электрон влетает с некоторой начальной скоростью  $v_0$  в плоский конденсатор параллельно пластинам и на равном расстоянии от них. К пластинам конденсатора приложена разность потенциалов  $U = 300$  В. Расстояние между пластинами  $d = 2$  см, длина конденсатора  $l = 10$  см. Какова должна быть предельная начальная скорость электрона, чтобы он не вылетел из конденсатора?

Ответ:  $v_0 = 3,64 \cdot 10^7$  м/с.

14. Электрон влетает в плоский горизонтально расположенный конденсатор параллельно его пластинам со скоростью  $v_0 = 10^7$  м/с. Напряженность поля в конденсаторе  $E = 10$  кВ/м; длина конденсатора  $l = 5$  см. Найдите модуль и направление скорости  $v$  электрона при вылете его из конденсатора.

Ответ:  $v = 1,33 \cdot 10^7$  м/с,  $\alpha \approx 41^\circ$ .

15. Положительный заряд равномерно распределен по поверхности шара радиусом  $R = 1$  см. Поверхностная плотность заряда  $\sigma = 10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup>. Какую работу надо совершить, чтобы перенести положительный заряд  $q = 9 \cdot 10^{-9}$  Кл из бесконечности на поверхность шара?

Ответ:  $A = 1,13 \cdot 10^{-9}$  Дж.

16. На расстоянии  $r = 6$  см от центра равномерно заряженной сферы радиусом  $R = 11$  мм напряженность электрического поля равна  $E = 77$  В/м. Определите потенциал сферы и поверхностную плотность заряда на сфере.

Ответ:  $\varphi = 179,2$  В.

17. Эквипотенциальная линия проходит через точку поля с напряженностью  $E = 5$  кВ/м, отстоящую от создающего заряда на расстоянии  $r_1 = 2,5$  см. На каком расстоянии от создающего поле заряда нужно провести другую эквипотенциальную линию, чтобы напряжение между линиями было  $U = 25$  В?

Ответ:  $r_2 = 31,2$  мм

18. Расстояние между зарядами  $q_1 = 10$  нКл и  $q_2 = -1$  нКл равно 1,1 м. Найдите напряженность поля в точке на прямой, соединяющей заряды, в которой потенциал поля равен нулю.

Ответ:  $E = 990$  В/м.

19. Определите модуль вектора напряженности электростатического поля в точке  $M(0,1; 0,2; 0,8)$ , потенциал которой равен: а)  $\varphi = Ax$ ; б)  $\varphi = B(x^2 - y^2)$ , где  $A = 10$  В/м<sup>2</sup>;  $B = 40$  В/м<sup>2</sup>.

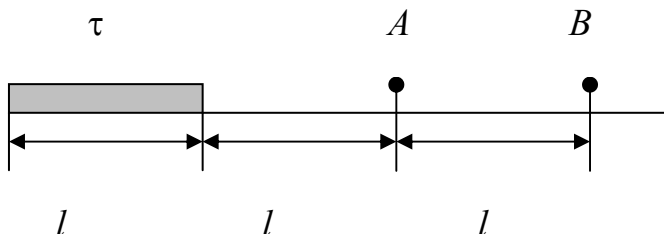
Ответ: а)  $E = 2,2$  В/м; б)  $E = 17,9$  В/м.

20. Между двумя пластинами, расположенными горизонтально в вакууме на расстоянии  $d = 4,8$  мм друг от друга, падает отрицательно заряженная шарообразная капелька масла радиусом  $r = 1,4 \cdot 10^{-5}$  м с ускорением  $a = 5,8$  м/с<sup>2</sup>. Сколько «избыточных» электронов имеет капелька, если

разность потенциалов между пластинами  $U = 1$  кВ? Плотность масла  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>.

Ответ:  $n = 1,1 \cdot 10^3$ .

21. На отрезке прямого тонкого проводника равномерно распределен заряд с линейной плотностью  $\tau = +10^{-8}$  Кл/см. Определите работу по перемещению заряда  $q = 1$  нКл из точки  $A$  в точку  $B$  (см. рисунок).



Ответ:  $A = 2,62$  мкДж.

### 1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ

*Диполь* – это система двух точечных, равных по абсолютному значению и противоположных по знаку зарядов, находящихся на некотором расстоянии друг от друга.

Вектор  $l$ , проведенный от отрицательного заряда диполя к его положительному заряду, называется плечом диполя.

Электрическим моментом диполя  $\vec{p}$  называется вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и равный произведению  $|q|$  на вектор  $\vec{l}$ :

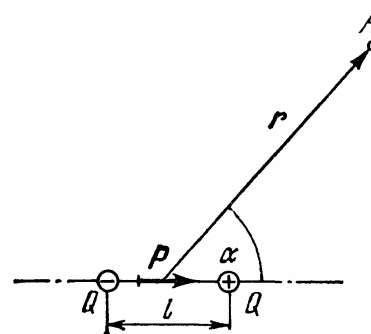
$$\vec{p} = |q|\vec{l}.$$

Диполь называется точечным, если его плечо много меньше расстояния  $r$  от центра диполя до точки, в которой определяют действие диполя ( $l \ll r$ ).

Напряженность поля точечного диполя

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3} \sqrt{1 + 3\cos^2 \alpha},$$

где  $\vec{p}$  – электрический момент диполя;  $r$  – модуль радиус-вектора, проведенного от центра диполя к точке, в которой определяют напряженность поля;  $\alpha$  – угол между радиус-вектором  $\vec{r}$  и плечом  $\vec{l}$  диполя (см. рисунок).



Напряженность поля точечного диполя в точке, лежащей на оси диполя ( $\alpha = 0$ ),

$$E = \frac{p}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^3}.$$

Напряженность поля точечного диполя в точке, лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины ( $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ),

$$E = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3}.$$

Потенциал поля точечного диполя

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3} \cos \alpha.$$

Потенциал поля точечного диполя в точке, лежащей на оси диполя ( $\alpha = 0$ ),

$$\varphi = \frac{p}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^3}.$$

Потенциал поля точечного диполя в точке, лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины ( $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ),

$$\varphi = 0.$$

Напряженность и потенциал неточечного диполя определяются, как для системы зарядов.

Механический момент  $\vec{M}$ , действующий на диполь с электрическим моментом  $\vec{p}$ , помещенный в однородное электрическое поле с напряженностью  $\vec{E}$ ,

$$\vec{M} = [\vec{p}\vec{E}], \text{ или } M = pE \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между направлениями векторов  $\vec{p}$  и  $\vec{E}$ .

В неоднородном электрическом поле кроме механического момента (пары сил) на диполь действует еще некоторая сила. В случае поля, обладающего симметрией относительно оси  $x$ , эта сила определяется по формуле

$$F_x = p \frac{\partial E}{\partial x} \cos \alpha,$$

где  $\frac{\partial E}{\partial x}$  – частная производная напряженности поля, характеризующая степень неоднородности поля в направлении оси  $x$ .

При  $\alpha > \frac{\pi}{2}$  сила  $F_x$  положительна. Это значит, что под ее действием диполь втягивается в область сильного поля.

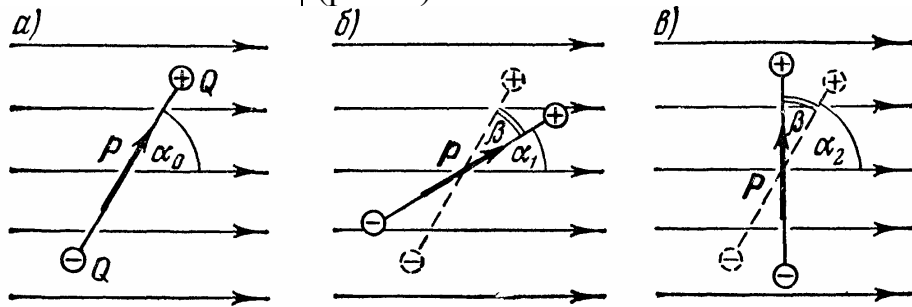
## Примеры решения задач

**Пример 1.** Диполь с электрическим моментом  $p = 2$  нКл·м находится в однородном электрическом поле с напряженностью  $E = 30$  кВ/м. Вектор  $\vec{p}$  составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с направлением силовых линий поля. Определите работу  $A$ , произведенную внешними силами при повороте диполя на угол  $\beta = 30^\circ$ .

Дано:	СИ
$p = 2$ нКл·м	$2 \cdot 10^{-9}$ Кл·м
$E = 30$ кВ/м	$E = 30000$ В/м
$\alpha = 60^\circ$	
$\beta = 30^\circ$	
$A = ?$	

### Решение

Из исходного положения (рис. а), диполь можно повернуть на угол  $\beta = 30^\circ = \frac{\pi}{6}$  двумя способами: по часовой стрелке до угла  $\alpha_1 = \alpha - \beta = \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{6}$  (рис. б) или против часовой стрелки до угла  $\alpha_2 = \alpha + \beta = \frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{2}$  (рис. в).



В первом случае диполь будет поворачиваться под действием сил поля. Следовательно, работа внешних сил при этом отрицательна. Во втором случае поворот может быть произведен только под действием внешних сил, и, следовательно, работа внешних сил при этом положительна.

Элементарная работа, совершаемая при повороте диполя на угол  $\alpha$

$$dA = Md\alpha = pE \sin \alpha d\alpha,$$

а полная работа при повороте на угол от  $\alpha$  до  $\alpha_1$

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{\alpha}^{\alpha_1} pE \sin \alpha d\alpha = pE \int_{\alpha}^{\alpha_1} \sin \alpha d\alpha = -pE(\cos \alpha_1 - \cos \alpha) = \\ &= pE(\cos \alpha - \cos \alpha_1) = -21,9 \text{ мкДж}. \end{aligned}$$

Работа внешних сил при повороте диполя против часовой стрелки

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\alpha}^{\alpha_2} pE \sin \alpha d\alpha = pE \int_{\alpha}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha = -pE(\cos \alpha_2 - \cos \alpha) = \\ &= pE(\cos \alpha - \cos \alpha_2) = 30 \text{ мкДж}. \end{aligned}$$

Ответ:  $A_1 = -21,9$  мкДж,  $A_2 = 30$  мкДж.

**Пример 2.** Точечный диполь с электрическим моментом  $p = 5$  пКл·м свободно установился в поле точечного заряда  $q = 100$  нКл на расстоянии  $r = 10$  см от него. Определите для этой точки  $\left| \frac{dE}{dr} \right|$ , характеризующую степень неоднородности поля в направлении силовой линии, и силу  $F$ , действующую на диполь.

Дано:	СИ	Решение
$p = 5$ пКл·м	$5 \cdot 10^{-12}$ Кл·м	Напряженность поля, в котором установился диполь
$q = 100$ нКл	$10^{-7}$ Кл	
$r = 10$ см	$0,1$ м	
$\left  \frac{dE}{dr} \right  - ?$		$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
$F - ?$		Степень неоднородности поля
		$\frac{dE}{dr} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( -\frac{2q}{r^3} \right);$

$$\left| \frac{dE}{dr} \right| = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r^3};$$

$$\left| \frac{dE}{dr} \right| = \frac{2 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1^3} = 1,8 \text{ МВ/м}^2.$$

Сила, действующая на диполь,

$$F = p \frac{\partial E}{\partial r} \cos \alpha;$$

$$\alpha = 0, \cos 0^0 = 1, \text{ поэтому } F = p \frac{\partial E}{\partial r};$$

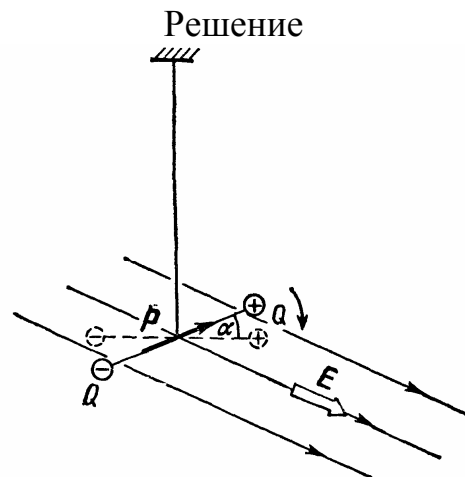
$$F = 5 \cdot 10^{-12} \cdot 1,8 \cdot 10^6 = 9 \text{ мкН.}$$

$$\text{Ответ: } \left| \frac{dE}{dr} \right| = 1,8 \text{ МВ/м}^2, F = 9 \text{ мкН.}$$

**Пример 3.** Диполь с электрическим моментом  $p = 100$  пКл·м прикреплен к упругой нити (см. рисунок). Когда в пространстве, где находится диполь, было создано электрическое поле с напряженностью  $E = 3$  кВ/м перпендикулярно плечу диполя и нити, диполь повернулся на угол  $\alpha = 30^\circ$ . Определите постоянную кручения  $C$  нити.



Дано:	СИ
$p = 100$ пКл·м	$100 \cdot 10^{-12}$ Кл·м
$E = 3$ кВ/м	$3000$ В/м
$\alpha = 30^\circ$	
$C - ?$	



Постоянной кручения называют величину, равную моменту силы, который вызывает закручивание нити на 1 радиан.

Момент, закручивающий нить на угол  $\alpha$ ,

$$M = C\alpha,$$

где  $C$  – постоянная кручения.

$$C = \frac{M}{\alpha}.$$

Так как  $M = pE \sin \alpha$ , то  $C = \frac{pE \sin \alpha}{\alpha}$ .

$$C = \frac{10^{-10} \cdot 3000 \cdot \sin 30^\circ}{\frac{\pi}{6}} = 286 \text{ нН} \cdot \text{м/рад}.$$

Ответ:  $C = 286$  нН·м/рад.

**Пример 4.** В атоме йода, находящемся на расстоянии  $r = 1$  нм от альфа-частицы, индуцирован электрический момент  $p = 1,5 \cdot 10^{-32}$  Кл·м. Определите поляризуемость  $\alpha$  атома йода.

Дано:	СИ
$p = 1,5 \cdot 10^{-32}$ Кл·м	$10^{-9}$ м
$r = 1$ нм	
$\alpha - ?$	

Решение

Индуцированный электрический момент атома

$$p = \alpha \epsilon_0 E_{\text{лок}},$$

где  $\alpha$  – поляризуемость атома;  $E_{\text{лок}}$  – напряженность локального поля, в котором находится атом.

В данном случае таким полем является поле, созданное альфа-частицей.

Напряженность этого поля

$$E_{\text{лок}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2|e|}{\epsilon r^2},$$

Из формулы для индуцированного электрического момента атома выразим  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{p}{\epsilon_0 E_{\text{лок}}} = \frac{2\pi r^2 p}{|e|}.$$

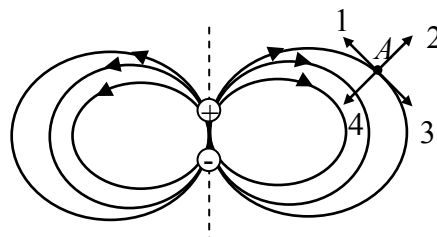
$$\alpha = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-18} \cdot 1,5 \cdot 10^{-32}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,89 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3.$$

Ответ:  $\alpha = 5,89 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3$

### Тесты

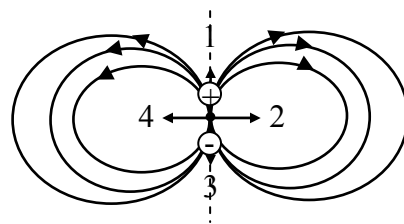
1. Электрический диполь – это система...
  - 1) двух равных по величине, но противоположных по знаку зарядов ( $+q$  и  $-q$ ), расположенных в одном и том же месте пространства;
  - 2) двух равных по величине положительных зарядов ( $+q$ ), расположенных в одном и том же месте пространства;
  - 3) двух равных по величине отрицательных зарядов ( $-q$ ), расположенных в одном и том же месте;
  - 4) двух равных по величине, но противоположных по знаку зарядов ( $+q$  и  $-q$ ), расположенных на некотором расстоянии  $l$  друг от друга;
  
2. Электрический дипольный момент  $\vec{p}$  (характеристика диполя) – это
  - 1) вектор, направленный от отрицательного к положительному заряду  $\vec{p} = |q|\vec{l}$ ;
  - 2) вектор, направленный от положительного к отрицательному заряду  $\vec{p} = |q|\vec{l}$ ;
  - 3) вектор, направленный перпендикулярно плоскости, в которой находятся положительный и отрицательный заряды  $\vec{p} = |q|\vec{l}$ .

3. На рисунке представлены силовые линии электрического поля диполя. Вектор напряженности электрического поля  $\vec{E}$  в точке А ориентирован в направлении....



- 1) 1;      2) 2;      3) 3;      4) 4.

4. На рисунке представлены силовые линии электрического поля диполя. Электрический дипольный момент диполя ориентирован в направлении....



- 1) 1;      2) 2;      3) 3;      4) 4.

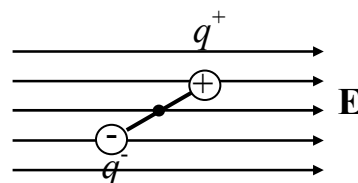
5. Поляризация диэлектрика – это..

1) процесс появления связанных зарядов в диэлектрике во внешнем электрическом поле;

2) процесс перераспределения связанных зарядов в диэлектрике во внешнем электрическом поле;

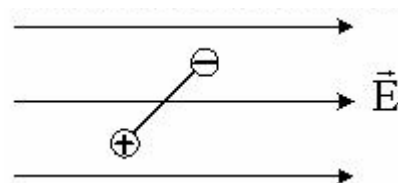
3) приобретение диэлектриком отличного от нуля электрического дипольного момента.

6. На рисунке изображен электрический диполь в однородном электрическом поле. Как будет направлен вращающий момент, действующий на диполь в данном случае?



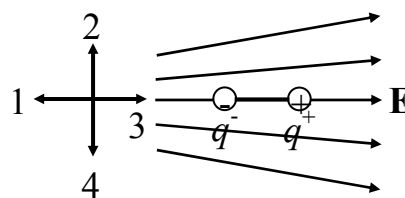
- 1) по направлению поля;  
2) против направления поля;  
3) перпендикулярно направлению поля к нам;  
4) перпендикулярно направлению поля от нас.

7. Жесткий электрический диполь находится в однородном электростатическом поле. Момент сил, действующий на диполь, направлен...



- 1) от нас;  
2) против вектора напряженности поля;  
3) к нам;  
4) вдоль вектора напряженности поля.

8. На рисунке изображен электрический диполь в неоднородном электрическом поле. Сила, действующая на диполь, в данном случае ориентирована в направлении....



- 1) 1;      2) 2;      3) 3;      4) 4.

9. Какие вещества называются диэлектриками?

1) Вещества, не способные к спонтанной намагниченности.

2) Вещества, не способные проводить электрический ток.

3) Вещества, обладающие кристаллической структурой.

4) Вещества, хорошо проводящие электрический ток.

10. Какие утверждения справедливы для *неполярного* диэлектрика?

- 1) Дипольный момент молекул диэлектрика в отсутствие внешнего электрического поля равен нулю.
- 2) Диэлектрическая восприимчивость диэлектрика обратно пропорциональна температуре.
- 3) Ионная поляризация молекул диэлектрика возникает при смещении подрешетки положительных ионов вдоль поля, а отрицательных – против поля.
- 4) Поляризованность диэлектрика прямо пропорциональна напряженности электрического поля.

11. Какие утверждения справедливы для полярного диэлектрика?

- 1) Дипольный момент молекул диэлектрика в отсутствии внешнего электрического поля равен нулю.
- 2) Диэлектрическая восприимчивость обратно пропорциональна температуре.
- 3) Образец диэлектрика в неоднородном внешнем электрическом поле вытягивается в область более сильного поля.

12. Какие утверждения справедливы для сегнетоэлектрика?

- 1) В определенном температурном интервале имеет место самопроизвольная поляризация в отсутствие внешнего электрического поля.
- 2) Диэлектрическая проницаемость зависит от напряженности поля.
- 3) В отсутствие внешнего электрического поля дипольные электрические моменты доменов равны нулю.

13. При помещении диэлектрика, состоящего из **неполярных** молекул, в электростатическое поле ...

- 1) в образце присутствуют только индуцированные электрические дипольные моменты атомов; вектор поляризованности образца направлен против направления внешнего поля;
- 2) в образце присутствуют только индуцированные электрические дипольные моменты атомов; вектор поляризованности образца направлен по направлению внешнего поля;
- 3) происходит ориентирование имевшихся электрических дипольных моментов молекул; вектор поляризованности образца направлен против направления внешнего поля;
- 4) происходит ориентирование имевшихся электрических дипольных моментов молекул; вектор поляризованности образца направлен по направлению внешнего поля.

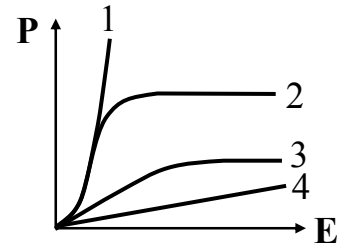
14. Напряженность электрического поля внутри диэлектрика всегда...

- 1) больше, чем в вакууме в  $\epsilon$  раз;
- 2) не зависит от  $\epsilon$ ;
- 3) меньше, чем в вакууме в  $\epsilon$  раз.

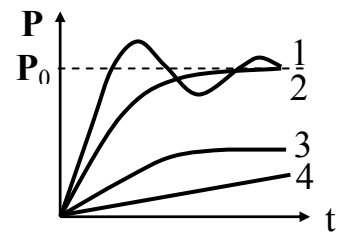
15. На рисунке представлены графики, отражающие характер зависимости поляризованности  $p$  диэлектрика от напряженности поля  $E$ .

Укажите зависимость, соответствующую...

- 1) неполярным диэлектрикам
- 2) полярным диэлектрикам
- 3) сегнетоэлектрикам

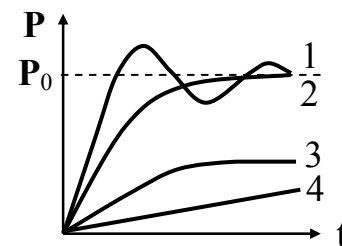


16. На рисунке представлены графики, отражающие характер зависимости поляризованности  $P$  диэлектрика от времени  $t$  при включении электрического поля напряженностью  $E$ . Укажите зависимость, соответствующую ионному и электронному механизмам поляризации:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

17. На рисунке представлены графики, отражающие характер зависимости поляризованности  $P$  диэлектрика от времени  $t$  при включении электрического поля напряженностью  $E$ . Укажите зависимость, соответствующую ориентационному механизму поляризации:



- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3;
- 4) 4.

18. Связь между основными характеристиками электрического поля в диэлектриках отображается соотношениями:  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ ;  $\vec{D} = (1 + \chi) \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ ;  $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ ;  $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$ , где  $\epsilon = 1 + \chi$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\vec{E}_0$  – напряженность электрического поля в вакууме;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля в диэлектрике;  $\vec{D}$  – индукция (смещение) электрического поля;  $\vec{P}$  – вектор поляризации (поляризованность). Относительная диэлектрическая проницаемость среды зависит от....

- 1) давления, температуры и других внешних факторов;
- 2) структуры и химического состава вещества и других внешних факторов;

3) структуры и химического состава вещества, а также от давления, температуры и других внешних факторов.

19. Связь между основными характеристиками электрического поля в диэлектриках отображается соотношениями:  $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ ;  $\vec{D} = (1 + \chi) \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ ;  $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}$ ;  $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$ , где  $\epsilon = 1 + \chi$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды;  $\vec{E}_0$  – напряженность электрического поля в вакууме;  $\vec{E}$  – напряженность электрического поля в диэлектрике;  $\vec{D}$  – индукция (смещение) электрического поля;  $\vec{P}$  – вектор поляризации (поляризованность). Относительная диэлектрическая проницаемость среды показывает....

1) во сколько раз электрическое поле возрастает, если оно создано в какой-либо среде;

2) во сколько раз электрическое поле ослабевает, если оно создано в какой-либо среде.

3) электрическое поле не изменяется, если оно создано в какой-либо среде;

### Задачи для самостоятельного решения

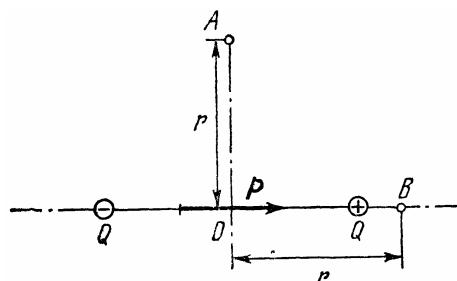
1. Электрический диполь образован зарядами, равными  $q = 2 \cdot 10^{-7}$  Кл, удаленными на расстояние  $l = 0,5$  см и расположенными в воде. Определите потенциал поля, созданного этим диполем в точке  $A$ , удаленной от диполя на расстояние  $r = 0,5$  м в направлении под углом  $\alpha = 30^\circ$ .

Ответ:  $\varphi = 4,3 \cdot 10^{-11}$  В.

2. Расстояние  $l$  между зарядами  $q = 3,2$  нКл диполя равно 12 см. Найдите напряженность  $E$  и потенциал  $\varphi$  поля, созданного диполем в точке, удаленной на расстояние  $r = 8$  см как от первого, так и от второго заряда.

Ответ:  $E = 6,72$  кВ/м.

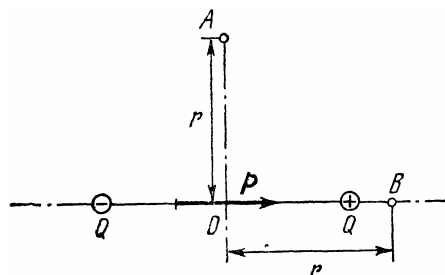
3. Диполь с электрическим моментом  $p = 0,12$  нКл·м образован двумя точечными зарядами  $q = 1$  нКл. Определите напряженность  $E$  и потенциал  $\varphi$  электрического поля в точках  $A$  и  $B$ , находящихся на расстоянии  $r = 8$  см от центра диполя.



Ответ:  $E_A = 1,08$  кВ/м;  $\varphi_A = 0$ ;  $E_B = 22$  кВ/м;  $\varphi_B = 386$  В.

4. Определите напряженность  $E$  и потенциал  $\varphi$  электрического поля, созданного диполем в точках  $A$  и  $B$ . Электрический момент диполя  $p = 1$  пКл·м, расстояние от точек  $A$  и  $B$  до центра диполя  $r = 10$  см.

Ответ:  $E_A = 9$  В/м;  $\varphi_A = 0$ ;  $E_B = 18$  В/м;  $\varphi_B = 0,9$  В.



5. Определите напряженность  $E$  и потенциал  $\varphi$  поля, создаваемого диполем с электрическим моментом  $p = 4$  пКл·м на расстоянии  $r = 10$  см от центра диполя, в направлении, составляющем угол  $\alpha = 60^\circ$  с вектором электрического момента.

Ответ:  $E = 47,6$  В/м;  $\varphi = 1,8$  В.

6. Диполь с электрическим моментом  $p = 1$  пКл·м равномерно вращается с частотой  $n = 10^3$  с<sup>-1</sup> относительно оси, проходящей через центр диполя и перпендикулярной его плечу. Вывести закон изменения потенциала как функцию времени в некоторой точке, отстоящей от центра диполя на  $r = 1$  см и лежащей в плоскости вращения диполя. Принять, что в начальный момент времени потенциал  $\varphi_0$  интересующей нас точки равен нулю.

Ответ:  $\varphi = A \sin \omega t$ , где  $A = 90$  В,  $\omega = 6,28 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>.

7. Диполь с электрическим моментом  $p = 20$  нКл·м находится в однородном электрическом поле с напряженностью  $E = 50$  кВ/м. Вектор электрического момента составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с линиями поля. Какова потенциальная энергия  $\Pi$  диполя? За нулевую потенциальную энергию примите энергию, соответствующую такому расположению диполя, когда вектор электрического момента диполя перпендикулярен линиям поля.

Ответ:  $\Pi = -500$  мкДж.

8. Диполь с электрическим моментом  $p = 100$  пКл·м свободно устанавливается в однородном электрическом поле с напряженностью  $E = 150$  кВ/м. Вычислите работу  $A$ , необходимую для того, чтобы повернуть диполь на угол  $\alpha = 180^\circ$ .

Ответ:  $A = 30$  мкДж.

9. Диполь с электрическим моментом  $p = 200$  пКл·м находится в неоднородном электрическом поле. Степень неоднородности поля характери-

зается величиной  $\frac{dE}{dx} = 1 \text{ МВ/м}^2$ , взятой в направлении оси диполя. Вычислите силу  $F$ , действующую на диполь в этом направлении.

Ответ:  $F = 0,2 \text{ мН}$ .

10. Диполь с электрическим моментом  $p = 4 \text{ пКл}\cdot\text{м}$  свободно установился в поле, созданном бесконечной прямой нитью, заряженной с линейной плотностью  $\tau = 500 \text{ нКл/м}$ , на расстоянии  $r = 10 \text{ см}$  от нее. Определите в этой точке величину  $\left| \frac{dE}{dr} \right|$ , характеризующую степень неоднородности поля в направлении силовой линии, и силу  $F$ , действующую на диполь.

Ответ:  $\left| \frac{dE}{dr} \right| = 0,9 \text{ МВ/м}^2$ ,  $F = 3,6 \text{ мкН}$ .

## 1.5. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

*Электрической емкостью* (или просто емкостью) уединенного проводника называется скалярная физическая величина, характеризующая способность проводника удерживать электрический заряд и численно равная заряду, который необходимо сообщить проводнику, чтобы его потенциал изменился на  $1 \text{ В}$ ,

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi},$$

где  $\Delta q$  – заряд, сообщенный проводнику;  $\Delta \varphi$  – изменение потенциала проводника.

Емкость уединенной проводящей сферы радиусом  $R$ , находящейся в бесконечной среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ ,

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R.$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{q}{\Delta \varphi},$$

где  $q$  – заряд конденсатора;  $\Delta \varphi$  – разность потенциалов на обкладках конденсатора.

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S}{d},$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между обкладками конденсатора;  $S$  – площадь обкладки;  $d$  – расстояние между обкладками.



Емкость плоского конденсатора, заполненного  $n$  слоями диэлектрика толщиной  $d_i$  каждый с диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_i$  (слоистый конденсатор),

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{\frac{d_1}{\epsilon_1} + \frac{d_2}{\epsilon_2} + \dots + \frac{d_n}{\epsilon_n}}.$$

Емкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)},$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы цилиндрических обкладок конденсатора;  $l$  – длина конденсатора;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между цилиндрами.

Емкость сферического конденсатора

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы сферических обкладок конденсатора;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между сферами.

Емкость последовательно соединенных конденсаторов

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n},$$

где  $n$  – число конденсаторов;

в случае двух конденсаторов  $C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ ;

в случае  $n$  одинаковых конденсаторов с емкостью  $C_1$  каждый  $C = \frac{C_1}{n}$ .

Емкость параллельно соединенных конденсаторов,

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

в случае двух конденсаторов  $C = C_1 + C_2$ ;

в случае  $n$  одинаковых конденсаторов с емкостью  $C_1$  каждый  $C = nC_1$ .

Энергия поля заряженного проводника

$$W_э = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q\varphi}{2}.$$

Энергия поля заряженного конденсатора

$$W_э = \frac{CU^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QU}{2}, \quad \text{или} \quad W_э = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 E^2 V.$$

Энергия поля поляризованного диэлектрика

$$W_э = \frac{1}{2}(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E^2 V.$$

Объемная плотность энергии (энергия электрического поля, приходящаяся на единицу объема)

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2} = \frac{D^2}{2\varepsilon\varepsilon_0},$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ ;  $D$  – электрическое смещение.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Емкость плоского воздушного конденсатора  $C = 1$  нФ, расстояние между обкладками  $d = 4$  мм. На помещенный между обкладками конденсатора заряд  $Q = 4,9$  нКл действует сила  $F = 98$  мкН. Площадь обкладки  $S = 100$  см<sup>2</sup>. Определите: 1) напряженность поля; 2) разность потенциалов между обкладками; 3) энергию поля конденсатора; 4) объемную плотность энергии.

Дано:	СИ	Решение
$C = 1$ нФ	$10^{-9}$ Ф	Поле между обкладками плоского конденсатора однородное. Напряженность поля конденсатора
$d = 4$ мм	$4 \cdot 10^{-3}$ м	
$Q = 4,9$ нКл	$4,9 \cdot 10^{-9}$ Кл	$E = F / Q,$
$F = 98$ мкН	$9,8 \cdot 10^{-5}$ Н	где $F$ – сила, с которой поле действует на заряд $Q$ , помещенный между обкладками конденсатора.
$S = 100$ см <sup>2</sup>	$10^{-2}$ м <sup>2</sup>	
$\varepsilon = 1$		Разность потенциалов между обкладками
$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м		
$E - ?, U - ?,$		$U = Ed.$
$W_э - ?,$		
$w - ?$		

Энергия поля конденсатора

$$W_{\text{Э}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SU^2}{2d}.$$

Объемная плотность энергии

$$w = W_{\text{Э}} / V = W_{\text{Э}} / (Sd),$$

где  $V = Sd$  – объем поля конденсатора.

Выполним вычисления:

$$E = 9,8 \cdot 10^{-5} / (4,9 \cdot 10^{-9}) = 2 \cdot 10^4 \text{ В/м} = 20 \text{ кВ/м};$$

$$U = 2 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 80 \text{ В};$$

$$W_{\text{Э}} = \frac{1,885 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2} \cdot 80^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 7,08 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} = 70,8 \text{ нДж};$$

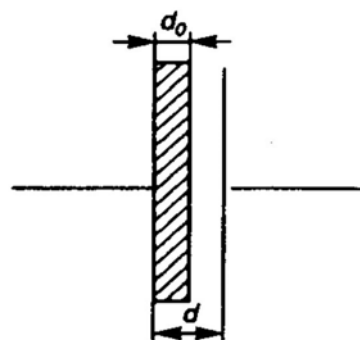
$$w = \frac{7,08 \cdot 10^{-8}}{10^{-2} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} = 1,77 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/м}^3.$$

Ответ: 1)  $E = 20$  кВ/м; 2)  $U = 80$  В; 3)  $W_{\text{Э}} = 70,8$  нДж; 4)  $w = 1,77 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>3</sup>.

**Пример 2.** Найдите, как изменяется емкость и энергия плоского воздушного конденсатора, если параллельно его обкладкам ввести металлическую пластину толщиной 1 мм. Площадь обкладки конденсатора и пластины 150 см<sup>2</sup>, расстояние между обкладками 6 мм. Конденсатор заряжен до 400 В и отключен от батареи.

Дано:	СИ
$d_0 = 1 \text{ мм}$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
$S = 150 \text{ см}^2$	$1,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$
$d = 6 \text{ мм}$	$6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
$U = 400 \text{ В}$	
$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$	
$\Delta C - ?, \Delta W_{\text{Э}} - ?$	

Решение



Емкость и энергия конденсатора при внесении в него металлической пластины изменяются. Это вызвано тем, что при внесении металлической пластины уменьшается расстояние между пластинами от  $d$  до  $(d - d_0)$ .

Используем формулу емкости плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 S / d ,$$

где  $S$  – площадь обкладки;  $d$  – расстояние между обкладками.

Изменение емкости конденсатора

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d - d_0} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S d_0}{d(d - d_0)} .$$

Так как электростатическое поле в плоском конденсаторе однородное, плотность энергии во всех его точках одинакова и равна

$$w = \frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 ,$$

где  $E$  – напряженность поля между обкладками конденсатора.

При внесении металлической пластины параллельно обкладкам напряженность поля осталась неизменной, а объем области, в которой локализовано электрическое поле, уменьшился на величину

$$\Delta V = S(d - d_0) - Sd = -Sd_0 .$$

Следовательно, изменение энергии (конечное значение ее меньше начального) произошло вследствие уменьшения объема поля конденсатора

$$\Delta W_{\text{э}} = w\Delta V = -\frac{1}{2} \varepsilon\varepsilon_0 E^2 S d_0 . \quad (1)$$

Напряженность поля  $E$  определяется через градиент потенциала

$$E = -U / d , \quad (2)$$

где  $U$  – разность потенциалов;  $d$  – расстояние между обкладками.

Формула (1) с учетом (2) принимает вид

$$\Delta W_{\text{э}} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2d^2} S d_0 .$$

Выполним вычисления:

$$\Delta C = \frac{1,8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 4,42 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 4,42 \text{ пФ} ;$$

$$\Delta W_{\text{э}} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 400^2}{2 \cdot 6^2 \cdot 10^{-6}} \cdot 15 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 2,95 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 295 \text{ нДж} .$$

Ответ:  $\Delta C = 4,42 \text{ пФ}$ ;  $\Delta W_{\text{э}} = 295 \text{ нДж}$ .

**Пример 3.** Плоский воздушный конденсатор, расстояние между пластинами которого равно  $d_1 = 5 \text{ мм}$ , заряжен до разности потенциалов

$\Delta\varphi = 6$  кВ. Площадь пластин конденсатора равна  $S = 12,5$  см<sup>2</sup>, пластины конденсатора раздвигаются до расстояния  $d_2 = 10$  см двумя способами:

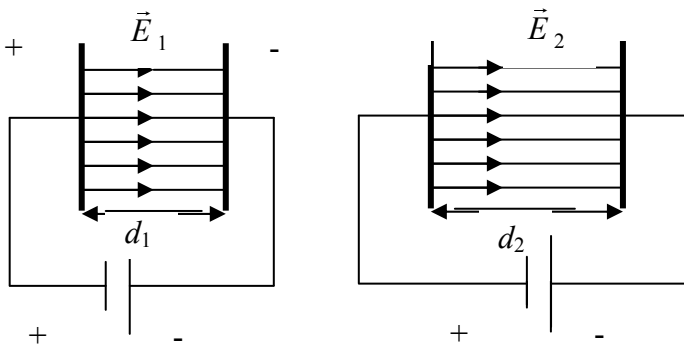
- 1) конденсатор остается соединенным с источником напряжения;
- 2) перед раздвижением конденсатор отсоединяется от источника напряжения.

Найти:

- а) изменение емкости конденсатора;
- б) изменение потока напряженности сквозь площадь пластин;
- в) изменение объемной плотности энергии электрического поля.

Решение задачи проведем отдельно для 1-го и 2-го случаев.

**1-й случай:** конденсатор остается соединенным с источником напряжения.

Дано:	СИ		
$d_1 = 5$ мм	$5 \cdot 10^{-3}$ м	Решение	
$\Delta\varphi = 6$ кВ	6000 В		
$S = 12,5$ см <sup>2</sup>	$12,5 \cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup>		
$d_2 = 10$ см	$10 \cdot 10^{-2}$ м		
$\varepsilon = 1$			
$\Delta C - ?$			
$\Delta\Phi_E - ?$			
$\Delta\omega - ?$			

При раздвижении пластин конденсатора, присоединенного к источнику тока, разность потенциалов между пластинами не изменяется и остается равной ЭДС источника тока:

$$\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \Delta\varphi.$$

Так как

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}; \quad \Delta\varphi = \frac{q}{C}; \quad E = \frac{\Delta\varphi}{d},$$

то при раздвижении пластин конденсатора изменяется емкость конденсатора, а следовательно, и заряд на его пластинах, и напряженность поля конденсатора.

Это приводит к изменению потока вектора напряженности

$$\Phi_E = ES,$$

а также к измерению объемной плотности энергии электрического поля

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}.$$

Пользуясь приведенными формулами, можно определить изменение: емкости конденсатора, потока вектора напряженности сквозь площадь обкладок, объемной плотности энергии электрического поля.

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_1} = \varepsilon\varepsilon_0 S \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right);$$

$$\Delta\Phi_E = \Phi_{E_2} - \Phi_{E_1} = E_2 S - E_1 S = S \left( \frac{\Delta\varphi}{d_2} - \frac{\Delta\varphi}{d_1} \right) = \Delta\varphi \cdot S \cdot \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right);$$

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_2^2}{2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_1^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 (\Delta\varphi)^2}{2} \left( \frac{1}{d_2^2} - \frac{1}{d_1^2} \right).$$

Выполним расчет значений искомых величин:

$$\Delta C = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{10^{-2}} - \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} \right) = -1,08 \text{ пФ};$$

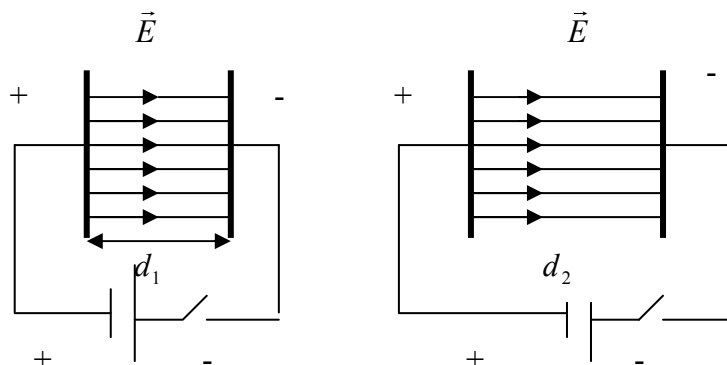
$$\Delta\Phi_E = 6 \cdot 10^3 \cdot 12,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{10^{-2}} - \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} \right) = -750 \text{ В}\cdot\text{м};$$

$$\Delta\omega = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} (6 \cdot 10^3)^2}{2} \left( \frac{1}{(10^{-2})^2} - \frac{1}{(5 \cdot 10^{-3})^2} \right) = -4,5 \text{ Дж/м}^3.$$

Раздвижение пластин конденсатора при  $\Delta\varphi = const$  приводит к уменьшению электроемкости ( $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ ), заряда на пластинах ( $q = C\Delta\varphi$ ), энергии электрического поля конденсатора ( $W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2}$ ) и потока вектора напряженности через площадь пластин ( $\Phi_E = ES$ ). За счет работы внешних сил и уменьшения энергии конденсатора происходит переход части заряда с пластин конденсатора на полюса источника тока (подзарядка источника тока).

Ответ:  $\Delta C = 1,08 \text{ пФ}$ ;  $\Delta\Phi_E = -750 \text{ В}\cdot\text{м}$ ;  $\Delta\omega = -4,5 \text{ Дж/м}^3$ .

**2-й случай:** перед раздвижением конденсатор отсоединяется от источника напряжения.



При раздвижении пластин конденсатора, отключенного от источника тока, заряд на пластинах измениться не может:

$$q_1 = q_2 = q.$$

$$\text{Так как } q = C\Delta\varphi, \quad C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad E = \frac{\Delta\varphi}{d}, \quad \Phi_E = ES,$$

то при этом изменяется емкость конденсатора, а следовательно, и разность потенциалов между пластинами. Напряженность электрического поля конденсатора остается неизменной:

$$q = \text{const}; \quad \sigma = \frac{q}{S} = \text{const}; \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \text{const}.$$

Пользуясь приведенными формулами, определим искомые величины:

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d_1} = \varepsilon\varepsilon_0 S \left( \frac{1}{d_2} - \frac{1}{d_1} \right);$$

$$\Delta\Phi_E = \Phi_{E_2} - \Phi_{E_1} = E_2 S - E_1 S = ES - ES = 0;$$

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_2^2}{2} - \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E_1^2}{2} = 0.$$

Выполним расчет значений искомых величин:

$$\Delta C = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 12,5 \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{10^{-2}} - \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} \right) = -1,08 \text{ пФ};$$

$$\Delta\Phi_E = 0; \quad \Delta\omega = 0.$$

Раздвижение пластин конденсатора при  $q = \text{const}$  приводит к уменьшению емкости ( $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ ) и увеличению разности потенциалов между пластинами ( $\Delta\varphi = \frac{q}{C}$ ). Поток вектора напряженности и объемная плотность энергии конденсатора остаются постоянными ( $\Phi_{E_1} = \Phi_{E_2}$ ,  $\omega_1 = \omega_2$ ). Энергия электрического поля конденсатора  $W = \omega V$  (поле однородное) при этом возрастает ( $V_2 > V_1$ ,  $W_2 > W_1$ ). Увеличение энергии происходит за счет работы внешних сил по раздвижению пластин.

$$\text{Ответ: } \Delta C = -1,08 \text{ пФ}; \quad \Delta\Phi_E = 0; \quad \Delta\omega = 0.$$

**Пример 4.** Два конденсатора емкостью по 3 мкФ заряжены один до напряжения 100 В, а другой до 200 В. Определите напряжение на обкладках полученной батареи, если конденсаторы соединены параллельно одноименно заряженными обкладками; разноименно заряженными обкладками.

Дано:	СИ	Решение
$C_1 = C_2 = 3 \text{ мкФ}$	$3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$	Напряжение $U$ , заряд $q$ и емкость $C$ конденсатора связаны между собой соотношением
$U_1 = 100 \text{ В}$		
$U_2 = 400 \text{ В}$		
$U' - ?$ , $U'' - ?$		$q = CU$ .
		Заряд первого конденсатора $q_1 = C_1 U_1$ .

Заряд второго конденсатора  $q_2 = C_2 U_2$ .

1) При соединении конденсаторов одноименно заряженными обкладками заряд полученной батареи

$$q = q_1 + q_2,$$

электроемкость батареи

$$C = C_1 + C_2 = 2C_1,$$

напряжение на обкладках полученной батареи

$$U' = \frac{q}{C} = \frac{q_1 + q_2}{2C_1} = \frac{U_1 C_1 + U_2 C_2}{2C_1} = \frac{C_1(U_1 + U_2)}{2C_1} = \frac{U_1 + U_2}{2};$$

$$U' = \frac{100 + 200}{2} = 150 \text{ В}.$$

2) При соединении конденсаторов разноименно заряженными обкладками заряд батареи

$$q = q_2 - q_1,$$

электроемкость батареи

$$C = C_1 + C_2 = 2C_1$$

напряжение на обкладках батареи

$$U'' = \frac{q}{2C_1} = \frac{q_2 - q_1}{2C_1} = \frac{U_2 C_2 - U_1 C_1}{2C_1} = \frac{C_1(U_2 - U_1)}{2C_1} = \frac{U_2 - U_1}{2};$$

$$U'' = \frac{200 - 100}{2} = 50 \text{ В}.$$

Ответ:  $U' = 150 \text{ В}$ ;  $U'' = 50 \text{ В}$

**Пример 5.** Под действием силы притяжения  $F = 1 \text{ мН}$  диэлектрик между обкладками конденсатора находится под давлением  $p = 1 \text{ Па}$ . Определите энергию и объемную плотность энергии поля конденсатора, если расстояние между его обкладками  $d = 1 \text{ мм}$ .



Дано:	СИ	Решение
$F = 1 \text{ мН}$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$	Известно, что давление $p = \frac{F}{S}$ , где $F$ – сила; $S$ – площадь. Сила $F$ , с которой притягиваются обкладки конденсатора, $F = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2 S}{2}.$
$p = 1 \text{ Па}$		
$d = 1 \text{ мм}$	$1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$	
$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$		
$W - ?$ , $\omega - ?$		

Из этой формулы выразим напряженность электрического поля в конденсаторе:

$$E = \sqrt{\frac{2F}{\varepsilon\varepsilon_0 S}}.$$

Учитывая, что напряжение на обкладках конденсатора  $U = Ed$ , а емкость конденсатора  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ , получим

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \cdot \frac{E^2 d^2}{2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S \cdot 2F \cdot d^2}{d \cdot 2 \cdot \varepsilon\varepsilon_0 S} = Fd;$$

$$W = 10^{-3} \cdot 10^{-3} = 10^{-6} \text{ Дж}.$$

Объемная плотность энергии электрического поля

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{W}{Sd} = p = 1 \text{ Дж/м}^3.$$

Ответ:  $W = 10^{-6} \text{ Дж}$ ;  $\omega = \text{Дж/м}^3$ .

### Тесты

- Электрическая емкость (электроемкость) проводника:
  - характеристика проводника, количественная мера его способности удерживать электрический заряд;
  - характеристика электрического поля проводника;
  - физическая величина, численно равная количеству электричества, на которое необходимо изменить заряд проводника, чтобы его потенциал изменился на единицу.
- Электрическая емкость (электроемкость) проводника зависит от:
  - формы поверхности, линейных размеров, расположения относительно других проводников, среды, окружающей проводник, от его заряда и потенциала;

2) формы поверхности, линейных размеров, расположения относительно других проводников, среды, окружающей проводник, и не зависит от его заряда и потенциала;

3) формы поверхности, линейных размеров, среды, окружающей проводник, и не зависит от его заряда и потенциала, расположения относительно других проводников.

3. Электрическая емкость (электроемкость) проводника:

1) прямо пропорциональна заряду проводника,  $C \sim q$ ;

2) обратно пропорциональна потенциалу проводника,  $C \sim \frac{1}{\phi}$ ;

3) не зависит от заряда проводника и его потенциала.

4. Три одинаковых конденсатора один раз соединены последовательно, другой – параллельно. Во сколько раз и когда емкость батареи конденсаторов будет больше?

1)  $\frac{C_{\text{парал}}}{C_{\text{послед}}} = \frac{1}{3}$ ;      2)  $\frac{C_{\text{парал}}}{C_{\text{послед}}} = \frac{1}{9}$ ;      3)  $\frac{C_{\text{парал}}}{C_{\text{послед}}} = 3$ ;

4)  $\frac{C_{\text{парал}}}{C_{\text{послед}}} = 9$ ;      5)  $\frac{C_{\text{парал}}}{C_{\text{послед}}} = 1$ .

5. Три конденсатора емкостями  $C_1 = 1$  мкФ,  $C_2 = 2$  мкФ и  $C_3 = 3$  мкФ соединены последовательно и присоединены к источнику напряжения с разностью потенциалов  $U = 220$  В. Какое напряжение установится между пластинами конденсатора  $C_1$ ?

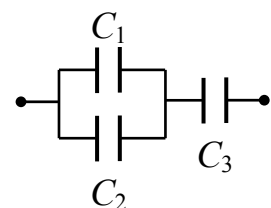
- 1) 120 В;      2) 60 В;      3) 40 В;      4) 20 В.

6. В плоском конденсаторе увеличили расстояние между пластинами в 3 раза, а площадь пластин уменьшили в 2 раза. Как изменилась емкость конденсатора?

- 1) уменьшилась в 6 раз;  
 2) увеличилась в 6 раз;  
 3) не изменилась;  
 4) увеличилась в 3 раза;  
 5) уменьшилась в 2 раза.

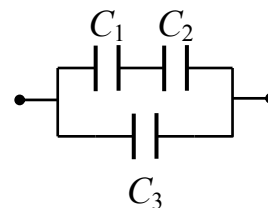
7. На рисунке представлена схема соединения конденсаторов  $C_1 = 1$  мкФ,  $C_2 = 1$  мкФ,  $C_3 = 2$  мкФ. Емкость такого соединения.....

- 1)  $C > 1$  мкФ;      2)  $C > 2$  мкФ;      3)  $C = 1$  мкФ;  
 4)  $C < 1$  мкФ;      5)  $C < 2$  мкФ



8. На рисунке представлена схема соединения конденсаторов  $C_1 = 1$  мкФ,  $C_2 = 1$  мкФ,  $C_3 = 2$  мкФ. Емкость  $C$  такого соединения...

- 1)  $C > 1$  мкФ;      2)  $C > 2$  мкФ;                      3)  $C = 2$  мкФ;  
4)  $C < 1$  мкФ;      5)  $C < 2$  мкФ.



9. Расстояние между обкладками плоского воздушного конденсатора, подключенного к источнику тока, увеличили в 2 раза. При этом энергия конденсатора...

- 1) увеличится в 2 раза;  
2) уменьшится в 4 раза;  
3) не изменится;  
4) увеличится в 4 раза;  
5) уменьшится в 2 раза.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Пылинка, заряд которой  $q = 6,4 \cdot 10^{-18}$  Кл, а масса  $m = 10^{-14}$  кг, удерживается в равновесии в плоском конденсаторе с расстоянием между обкладками  $d = 4$  мм. Определите разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Ответ:  $U = 62$  В.

2. При разности потенциалов  $U_1 = 900$  В посередине между обкладками плоского конденсатора в равновесии находилась пылинка. Расстояние между обкладками конденсатора  $d = 10$  мм. При уменьшении напряжения пылинка через  $t = 0,5$  с достигла нижней обкладки. Определите это напряжение.

Ответ:  $U_2 = 896$  В.

3. Конденсатор, заряженный до напряжения  $U_1 = 200$  В, соединен с незаряженным конденсатором такой же электроемкости: 1) параллельно; 2) последовательно. Какое напряжение установится между обкладками конденсатора в этих случаях?

Ответ: 1)  $U = 100$  В; 2)  $U = 200$  В.

4. Как нужно соединить три конденсатора электроемкостью  $C_1 = 3$  мкФ,  $C_2 = 6$  мкФ и  $C_3 = 9$  мкФ, чтобы электроемкость полученной батареи была: 1) минимальной; 2) максимальной.

Ответ: 1)  $C = 1,6$  мкФ; 2)  $C = 18$  мкФ.

5. Напряженность  $E$  поля внутри плоского воздушного конденсатора с площадью обкладок по  $S = 100 \text{ см}^2$  равна  $120 \text{ кВ/м}$ . Напряжение на конденсаторе  $U = 600 \text{ В}$ . Определите энергию, поверхностную плотность зарядов и емкость конденсатора.

Ответ:  $W = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ ;  $\sigma = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$ ;  $C = 1,77 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$ .

6. Определите работу, совершаемую при раздвигании обкладок плоского конденсатора площадью  $S = 100 \text{ см}^2$  каждая на расстояние  $x = 1,5 \text{ см}$ , при условии, что обкладки несут заряд  $0,4$  и  $-0,4 \text{ мкКл}$ .

Ответ:  $A = 1,36 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$ .

7. Объемная плотность энергии электрического поля внутри заряженного конденсатора с твердым диэлектриком равна  $\omega = 3 \text{ Дж/м}^3$ . Определите давление, производимое пластинами конденсатора на диэлектрик.

Ответ:  $p = 3 \text{ Па}$ .

8. Давление  $p$ , производимое обкладками плоского конденсатора на твердый диэлектрик, находящийся между ними, равно  $1,5 \text{ Па}$ . Определите энергию электрического поля конденсатора и объемную плотность энергии, если площадь обкладок  $S = 100 \text{ см}^2$ , а расстояние между ними  $d = 0,5 \text{ см}$ .

Ответ:  $W = 7,5 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ .

9. Найдите напряженность поля плоского конденсатора и объемную плотность энергии, если расстояние между обкладками конденсатора  $d = 0,05 \text{ м}$ . Конденсатор заряжен до разности потенциалов  $\Delta\phi = 600 \text{ В}$  и обладает энергией  $W = 3,2 \text{ мкДж}$ .

Ответ:  $E = 12 \cdot 10^3 \text{ В/м}$

10. Конденсатор с парафиновым диэлектриком заряжен до разности потенциалов  $\Delta\phi = 150 \text{ В}$ . Напряженность поля в нем  $E = 6 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ . Площадь пластин  $S = 6 \text{ см}^2$ . Определите емкость конденсатора и поверхностную плотность заряда на обкладках ( $\varepsilon = 2$ ).

Ответ:  $\sigma = 1,06 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^2$ ;  $C = 4,25 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$ .

11. Конденсатор емкостью  $C_1 = 16 \text{ мкФ}$  последовательно соединен с конденсатором неизвестной емкости, и они подключены к источнику постоянного напряжения  $U = 12 \text{ В}$ . Определите емкость второго конденсатора, если заряд батареи  $q = 24 \text{ мкКл}$ .

Ответ:  $C_2 = 2,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ .

12. Батарею из двух конденсаторов емкостью  $C_1 = 400$  пФ и  $C_2 = 500$  пФ, соединенных последовательно, включили в сеть с напряжением  $U_1 = 220$  В. Потом батарею отключили от сети, конденсаторы разъединили и соединили параллельно обкладками, имеющими одноименные заряды. Каким станет напряжение на зажимах полученной батареи?

Ответ:  $U_2 = 108,6$  В.

13. Заряд конденсатора  $q = 1$  мкКл, площадь пластин  $S = 100$  см<sup>2</sup>, зазор между пластинками заполнен слюдой. Определите объемную плотность энергии поля конденсатора и силу притяжения пластин.

Ответ:  $F = 0,94$  Н;  $\omega = 24,2$  Дж/м<sup>3</sup>.

14. К одной из обкладок плоского конденсатора прилегает стеклянная плоскопараллельная пластинка ( $\varepsilon = 7$ ) толщиной 9 мм. После того как конденсатор отключили от источника напряжением 220 В и вынули стеклянную пластинку, между обкладками установилась разность потенциалов 976 В. Определите расстояние между обкладками и отношение конечной и начальной энергий конденсатора.

Ответ:  $d = 10^{-2}$  м;  $\frac{W_2}{W_1} = 4,44$ .

15. Найдите объемную плотность энергии электрического поля, создаваемого заряженной металлической сферой радиусом  $R = 5$  см на расстоянии  $r = 5$  см от ее поверхности, если поверхностная плотность заряда на ней  $\sigma = 2 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>.

Ответ:  $\omega = 0,014$  Дж/м<sup>3</sup>.

16. Площадь пластин плоского слюдяного конденсатора  $S = 1,1$  см<sup>2</sup>, зазор между ними  $d = 3$  мм. При разряде конденсатора выделилась энергия  $W = 1$  мкДж. До какой разности потенциалов был заряжен конденсатор?

Ответ:  $U = 1014$  В.

17. Энергия плоского воздушного конденсатора  $W = 0,4$  нДж, разность потенциалов на обкладках  $\Delta\phi = 60$  В, площадь пластин  $S = 1$  см<sup>2</sup>. Определите расстояние между обкладками, напряженность и объемную плотность энергии поля конденсатора.

Ответ:  $d = 0,004$  м;  $E = 1,5 \cdot 10^4$  В/м;  $\omega = 0,001$  Дж/м<sup>3</sup>.

## 2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

### 2.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*Электрический ток* – это упорядоченное движение свободных заряженных частиц.

*Свободные заряды* – электрически заряженные микрочастицы, не связанные с конкретными атомами или молекулами вещества и способные перемещаться в нем на расстояния, многократно превышающие размеры атомов и молекул. В металлах свободными зарядами являются электроны, в электролитах – ионы, в газах – электроны и ионы, в полупроводниках – электроны и дырки.

*Сила тока* – скалярная величина, равная заряду, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

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

где  $dq$  – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время  $dt$ .

*Плотность тока* – векторная величина, направление которой совпадает с направлением вектора скорости упорядоченного движения положительно заряженных частиц, и численно равная заряду, проходящему в единицу времени через единицу площади поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

Сопротивление однородного проводника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника;  $l$  – длина проводника.

Зависимость удельного сопротивления от температуры

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  – удельные сопротивления соответственно при  $t$  и  $0$  °С;  $t$  – температура (по шкале Цельсия);  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Закон Ома для однородного участка цепи

$$I = \frac{U}{R},$$

где  $U$  – напряжение на концах участка.

Закон Ома в дифференциальной форме

$$I = \frac{E}{\rho},$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в проводнике.

### Законы соединения проводников

Соединение	Последовательное	Параллельное
Постоянный параметр цепи	$I = \text{const}$	$U = \text{const}$
Суммируемая величина	$U = \sum_{i=1}^n U_i$	$I = \sum_{i=1}^n I_i$
Общее сопротивление цепи	$R = \sum_{i=1}^n R_i$	$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$

*Электродвижущая сила, действующая в цепи* – скалярная величина, характеризующая действие сторонних сил в источниках тока и в замкнутой цепи, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного электрического заряда вдоль этой цепи:

$$\varepsilon = \frac{A}{q} = \oint \vec{E}_{\text{ст}} d\vec{l}.$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon}{R + r},$$

где  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – разность потенциалов на концах участка цепи;  $\varepsilon$  – ЭДС источников тока, входящих в участок;  $R$  – сопротивление участка цепи;  $r$  – внутреннее сопротивление источников тока.

Закон Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

где  $R$  – сопротивление внешнего участка цепи;  $\varepsilon$  и  $r$  – ЭДС и внутреннее сопротивление источника соответственно.

Правила Кирхгофа:

а) первое правило – алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю, т.е.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

где  $n$  – число токов, сходящихся в узле.

б) второе правило – в замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений на всех участках контура равна алгебраической сумме электродвижущих сил, т.е.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i,$$

где  $I_i$  – сила тока на  $i$ -м участке;  $R_i$  – активное сопротивление  $i$ -го участка;  $\varepsilon_i$  – ЭДС источников тока на  $i$ -м участке;  $n$  – число участков, содержащих активное сопротивление;  $k$  – число участков, содержащих источники тока.

Работа тока на внешнем участке цепи

$$A = IUt = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R},$$

где  $t$  – время.

Полезная мощность тока

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

Полная мощность, выделяющаяся в цепи

$$P = I\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R + r}.$$

Коэффициент полезного действия электрической установки

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{IU}{I\varepsilon} = \frac{IR}{I(R + r)} = \frac{R}{R + r}.$$

Закон Джоуля – Ленца

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t,$$

где  $Q$  – количество теплоты, выделяющееся в проводнике сопротивлением  $R$  за время  $t$ ;  $I$  – сила тока, текущего по проводнику;  $U$  – напряжение (разность потенциалов) на концах проводника.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме

$$w = j^2 \rho.$$



### Примеры решения задач

**Пример 1.** Напряжение на концах проводника сопротивлением  $R = 5 \text{ Ом}$  за  $t = 0,5 \text{ с}$  равномерно возрастает от  $U_1 = 0$  до  $U_2 = 20 \text{ В}$ . Какой заряд проходит по проводнику за это время?

Дано:  
 $R = 5 \text{ Ом}$   
 $t = 0,5 \text{ с}$   
 $U_1 = 0$   
 $U_2 = 20 \text{ В}$   


---

 $q - ?$

Решение  
 За время  $dt$  по проводнику переносится заряд  

$$dq = Idt,$$
 где  $I = \frac{U(t)}{R}$  – сила тока в проводнике;  $R$  – сопротивление проводника;  $U(t)$  – напряжение на концах проводника.

Напряжение  $U$  линейно изменяется со временем, т.е. можно записать

$$U(t) = kt,$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $k = \frac{\Delta U}{\Delta t}$ ,  $k = \frac{20 - 0}{0,5} = 40 \text{ В/с}$ .

Заряд  $q$ , перенесенный по проводнику за  $t = 0,5 \text{ с}$ ,

$$q = \int_0^{0,5} dq = \int_0^{0,5} Idt = \int_0^{0,5} \frac{U(t)}{R} dt = \int_0^{0,5} \frac{k}{R} t dt = \frac{k}{R} \frac{t^2}{2} \Big|_0^{0,5}.$$

Выполним вычисления:

$$q = \frac{40 \cdot 0,5^2}{2 \cdot 5} = 1 \text{ Кл.}$$

Ответ:  $q = 1 \text{ Кл}$ .

**Пример 2.** Сила тока в резисторе линейно нарастает от  $I = 0$  до  $I_1 = 8 \text{ А}$  за время  $t_1 = 4 \text{ с}$ . Сопротивление резистора  $R = 10 \text{ Ом}$ . Определите количество теплоты, выделившееся в резисторе за первые  $t_2 = 3 \text{ с}$ .

Дано:  
 $t_0 = 0$   
 $t_1 = 4 \text{ с}$   
 $I = 0$   
 $I_1 = 8 \text{ А}$   
 $t_2 = 3 \text{ с}$   
 $R = 10 \text{ Ом}$   


---

 $Q - ?$

Решение  
 По закону Джоуля – Ленца  

$$dQ = I^2 R dt. \tag{1}$$
 Так как сила тока является функцией времени, то  

$$I = kt,$$
 где  $k$  – коэффициент пропорциональности, численно равный приращению тока в единицу времени,  

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{8}{4} = 2 \text{ А/с}.$$

Следовательно,  $dQ = k^2 t^2 R dt$ .

За первые три секунды выделится количество теплоты

$$Q = \int_{t_0}^{t_2} k^2 t^2 R dt = k^2 R \int_{t_0}^{t_2} t^2 dt = \frac{k^2 R}{3} (t_2^3 - t_0^3).$$

Выполним вычисления

$$Q = 4 \cdot 10 \cdot 27 / 3 = 360 \text{ Дж.}$$

Ответ:  $Q = 360 \text{ Дж.}$

**Пример 3.** Батарея состоит из пяти последовательно соединенных элементов. ЭДС каждого  $\varepsilon = 1,4 \text{ В}$ , внутреннее сопротивление каждого  $r = 0,3 \text{ Ом}$ . При каком токе полезная мощность батареи равна  $p = 8 \text{ Вт}$ ? Определите наибольшую полезную мощность батареи.

<p>Дано:</p> <p><math>\varepsilon_i = 1,4 \text{ В}</math></p> <p><math>r_i = 0,3 \text{ Ом}</math></p> <p><math>P = 8 \text{ Вт}</math></p> <p><math>n = 5</math></p> <hr style="border: 0; border-top: 1px solid black;"/> <p><math>I - ?</math></p> <p><math>p_{\max} - ?</math></p>	<p style="text-align: center;">Решение</p> <p>Полезная мощность батареи</p> $P = I^2 R, \quad (1)$ <p>где <math>R</math> – сопротивление внешнего участка цепи; <math>I</math> – сила тока, текущего в цепи, которая определяется по закону Ома</p> $I = \frac{n\varepsilon_i}{nr_i + R}, \quad (2)$
---	--

или

$$I(nr_i + P / I^2) = n\varepsilon_i. \quad (3)$$

Преобразуя выражение (3), получаем квадратное уравнение относительно  $I$ :

$$nr_i I^2 - n\varepsilon_i I + P = 0.$$

Решая квадратное уравнение, находим

$$I_{1,2} = \frac{n\varepsilon_i \pm \sqrt{n^2 \varepsilon_i^2 - 4nr_i P}}{2nr_i}.$$

Для того чтобы определить наибольшую полезную мощность батареи, найдем зависимость ее от внешнего сопротивления.

Подставим в уравнение (1) выражение (2):

$$P = n^2 \varepsilon_i^2 R / (nr_i + R)^2. \quad (4)$$

Из этой формулы следует, что при постоянных величинах  $\varepsilon_i$  и  $r_i$  мощность является функцией одной переменной – внешнего сопротивления  $R$ .

Известно, что эта функция имеет максимум, если  $dP/dR = 0$ , следовательно,

$$\frac{dP}{dR} = \frac{n^2 \varepsilon_i^2 (R + nr_i) - 2n^2 \varepsilon_i^2 R}{(R + nr_i)^3} = 0;$$

$$n^2 \varepsilon_i^2 (R + nr_i) - 2n^2 \varepsilon_i^2 R = 0. \quad (5)$$

Таким образом, задача сводится к отысканию сопротивления внешнего участка цепи. Из решения уравнения (5) следует  $R = nr_i$ . Подставляя найденное значение  $R$  в формулу (4), имеем

$$P_{\max} = n\varepsilon_i^2 / (4r_i).$$

Выполним вычисления:

$$I_1 = \frac{5 \cdot 1,4 + \sqrt{5^2 \cdot 1,4^2 - 4 \cdot 5 \cdot 0,3 \cdot 8}}{2 \cdot 5 \cdot 0,3} = 2,66 \text{ А};$$

$$I_2 = \frac{5 \cdot 1,4 - \sqrt{5^2 \cdot 1,4^2 - 4 \cdot 5 \cdot 0,3 \cdot 8}}{2 \cdot 5 \cdot 0,3} = 2 \text{ А};$$

$$P_{\max} = \frac{5 \cdot 1,4^2}{4 \cdot 0,3} = 8,16 \text{ Вт}.$$

Ответ:  $I_1 = 2,66 \text{ А}; I_2 = 2 \text{ А}; P_{\max} = 8,16 \text{ Вт}.$

**Пример 4.** Внутреннее сопротивление аккумулятора  $r = 2 \text{ Ом}$ . При замыкании его одним резистором сила тока в цепи равна  $I_1 = 4 \text{ А}$ , при замыкании другим –  $I_2 = 2 \text{ А}$ . Во внешней цепи в обоих случаях выделяется одинаковая мощность. Определите ЭДС аккумулятора.

Дано:	
$r = 2 \text{ Ом}$	
$I_1 = 4 \text{ А}$	
$I_2 = 2 \text{ А}$	
$P_1 = P_2$	
$\varepsilon - ?$	

Решение  
По закону Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}.$$

Сила тока в цепи в первом случае

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_1 + r}, \quad (1)$$

во втором –

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_2 + r}. \quad (2)$$

Выразим из уравнений (1) и (2) ЭДС аккумулятора:

$$\varepsilon = I_1(R_1 + r);$$

$$\varepsilon = I_2(R_2 + r). \quad (3)$$

Из равенств (3) следует, что

$$I_1(R_1 + r) = I_2(R_2 + r). \quad (4)$$

Мощность, выделяемая на внешнем участке цепи в первом случае  $P_1 = I_1^2 R_1$ , втором –  $P_2 = I_2^2 R_2$ .

Из условия равенства мощностей следует, что

$$I_1^2 R_1 = I_2^2 R_2. \quad (5)$$

Решая совместно уравнения (4) и (5), получаем

$$R_1 = \frac{I_2 r}{I_1}; \quad R_2 = \frac{I_1 r}{I_2}.$$

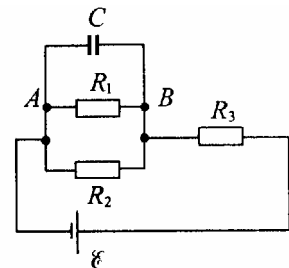
Таким образом:  $R_1 = \frac{2 \cdot 2}{4} = 1$  Ом;  $R_2 = \frac{4 \cdot 2}{2} = 4$  Ом.

Подставляя значение  $R_1$  в уравнение (3), получаем

$$\varepsilon = I_1 r \left( \frac{I_2}{I_1} + 1 \right); \quad \varepsilon = 4 \cdot 2 \left( \frac{2}{4} + 1 \right) = 12 \text{ В.}$$

Ответ:  $\varepsilon = 12$  В.

**Пример 5.** На рисунке  $R_1 = R_2 = 50$  Ом,  $R_3 = 100$  Ом. Емкость конденсатора  $C = 50$  нФ. Определите ЭДС источника тока, пренебрегая его внутренним сопротивлением, если заряд на конденсаторе  $q = 2,2$  мкКл.



Дано:	
$R_1 = R_2 = 50$ Ом	
$R_3 = 100$ Ом	
$C = 50$ нФ	$50 \cdot 10^{-9}$ Ф
$q = 2,2$ мкКл	$2,2 \cdot 10^{-6}$ Кл
$\varepsilon = ?$	

Решение

Напряжение на обкладках конденсатора

$$U = \frac{q}{C}$$

равно напряжению на участке из двух параллельно соединенных резисторов с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$ .

Сопротивление этого участка  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ , а напряжение на его концах

$$U = IR = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Выразим из этой формулы силу тока в цепи

$$I = \frac{U(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}, \text{ или } I = \frac{q(R_1 + R_2)}{CR_1 R_2}.$$

Напряжение на концах резистора сопротивлением  $R_3$  равно

$$U_3 = IR_3 = \frac{q(R_1 + R_2)R_3}{CR_1 R_2}.$$

ЭДС источника тока

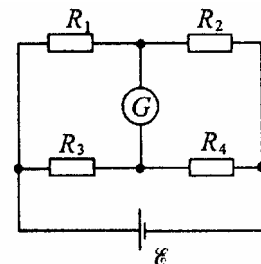
$$\varepsilon = U + U_3 = \frac{q}{C} \left( 1 + \frac{(R_1 + R_2)R_3}{R_1 R_2} \right).$$

Выполним вычисления:

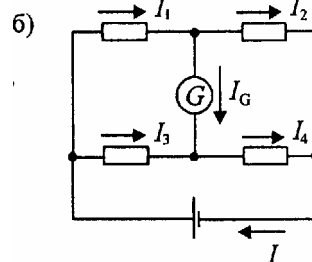
$$\varepsilon = \frac{2,2 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-9}} \left( 1 + \frac{(50 + 50)100}{50 \cdot 50} \right) = 220 \text{ В}.$$

Ответ:  $\varepsilon = 220 \text{ В}$ .

**Пример 6.** На рисунке  $\varepsilon = 2 \text{ В}$ ,  $R_1 = 60 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 40 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_4 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_G = 100 \text{ Ом}$ . Определите силу тока  $I_G$  через гальванометр.



Дано:  
 $\varepsilon = 2 \text{ В}$   
 $R_1 = 60 \text{ Ом}$   
 $R_2 = 40 \text{ Ом}$   
 $R_3 = R_4 = 20 \text{ Ом}$   
 $R_G = 100 \text{ Ом}$   
 $I_G = ?$



Решение

Запишем математические выражения первого и второго правил Кирхгофа для разветвленной цепи, схема которой представлена в условии задачи

а) для узлов:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_3; \\ I_1 &= I_2 + I_G; \\ I_2 + I_4 &= I; \\ I_3 + I_G &= I_4; \end{aligned} \tag{1}$$

б) для контуров:

$$\begin{aligned}I_1 R_1 + I_2 R_2 &= \varepsilon ; \\I_3 R_3 + I_4 R_4 &= \varepsilon ; \\I_1 R_1 + I_G R_G + I_4 R_4 &= \varepsilon .\end{aligned}\tag{2}$$

Подставим в уравнения (2) значения заданных величин и упростим эти уравнения:

$$\begin{aligned}6I_1 + 4I_2 &= 0,2 ; \\2I_3 + 2I_4 &= 0,2 ; \\6I_1 + 10I_G + 2I_4 &= 0,2 .\end{aligned}$$

Решая уравнения (2) совместно с уравнениями (1), получим систему трех уравнений с тремя неизвестными:

$$\begin{aligned}6I_1 + 4(I_1 - I_G) &= 0,2 ; \\2(I_4 - I_G) + 2I_4 &= 0,2 ; \\6I_1 + 10I_G + 2I_4 &= 0,2 .\end{aligned}$$

Решив систему, определим значения неизвестных:

$$10I_1 - 4I_G = 0,2 \rightarrow I_1 = \frac{0,2 + 4I_G}{10} ;$$

$$4I_4 - 2I_G = 0,2 \rightarrow I_4 = \frac{0,2 + 2I_G}{4} ;$$

$$6I_1 + 10I_G + 2I_4 = 0,2 .$$

$$6\left(\frac{0,2 + 4I_G}{10}\right) + 10I_G + 2\left(\frac{0,2 + 2I_G}{4}\right) = 0,2 ;$$

$$1,2 + 24I_G + 100I_G + 1 + 10I_G = 0,2 ; \quad 134I_G = -0,2 ;$$

$$I_G = -1,49 \cdot 10^{-3} \text{ А} .$$

Ответ:  $I_G = -1,49 \cdot 10^{-3}$  А; ток направлен в сторону, противоположную первоначально выбранной

### Тесты

1. Электрический ток – это....

1) упорядоченное движение только положительных электрических зарядов относительно той или иной среды;

2) упорядоченное движение только отрицательных электрических зарядов относительно той или иной среды;

3) упорядоченное движение любых электрических зарядов относительно той или иной среды.

2. Ток проводимости – это...

1) электрический ток, возникающий в проводниках под влиянием различных факторов и представляющий собой упорядоченное движение заряженных частиц относительно среды (т.е. внутри макроскопических тел);

2) электрический ток, возникающий в проводниках под влиянием электрического поля и представляющий собой упорядоченное движение заряженных частиц относительно среды (т.е. внутри макроскопических тел);

3) электрический ток, возникающий в проводниках под влиянием электрического поля и представляющий собой упорядоченное движение заряженных частиц в пространстве.

3. Условия существования тока проводимости:

1) наличие свободных заряженных частиц, не связанных в единую электрически нейтральную систему, электрического поля в проводниках, которое определяется напряжением на концах проводника, замкнутость проводников;

2) только наличие свободных заряженных частиц, не связанных в единую электрически нейтральную систему;

3) только наличие электрического поля в проводниках, которое определяется напряжением на концах проводника и замкнутость проводников;

4) только наличие электрического поля в проводниках, которое определяется напряжением на концах проводника.

4. Основные действия электрического тока:

1) только магнитное;

2) только тепловое и химическое;

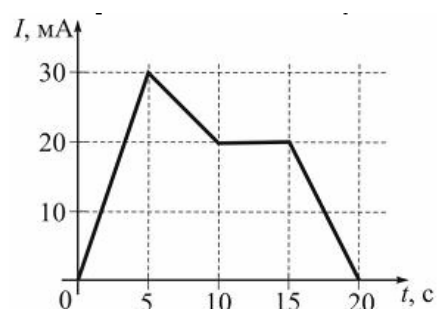
3) только магнитное, тепловое и химическое;

4) магнитное, тепловое, химическое и биологическое.

5. Зависимость силы тока от времени представлена на графике. Какой заряд пройдет по проводнику в интервале времени от 5 с до 10 с?

1) 50 мКл;      2) 125 мКл;

3) 225 мКл;    4) 275 мКл;



6. Сила тока за 10 с равномерно возрастает от 1 А до 3 А. За это время через поперечное сечение проводника переносится заряд, равный...

1) 10 Кл;

2) 20 Кл;

3) 30 Кл;

4) 40 Кл.

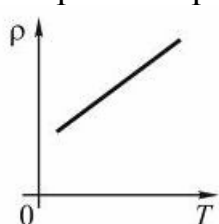
7. Электрическое сопротивление металлов зависит от:

1) материала проводника, его длины и поперечного сечения, температуры;

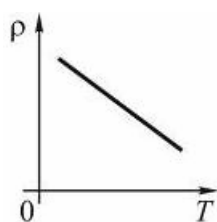
2) материала проводника, его длины и поперечного сечения, температуры и внешних факторов, влияющих на кристаллическое строение металлических проводников;

3) материала проводника, его длины и поперечного сечения, внешних факторов, влияющих на кристаллическое строение металлических проводников.

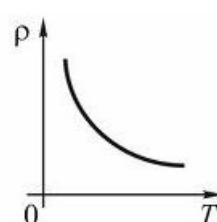
8. Температурную зависимость удельного сопротивления металлов верно отражает график:



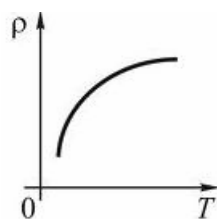
1)



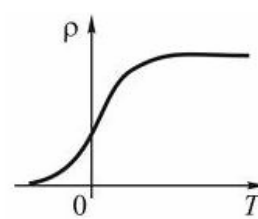
2)



3)

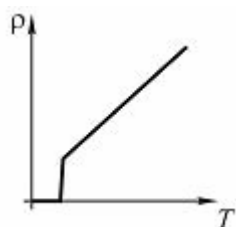


4)

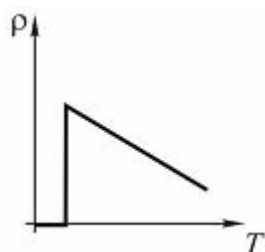


5)

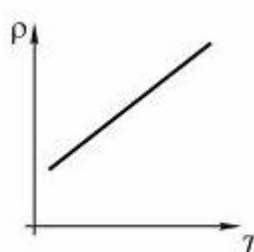
9. Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры в области сверхпроводящего перехода представлена графиком ...



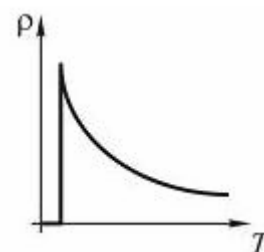
1)



2)



3)

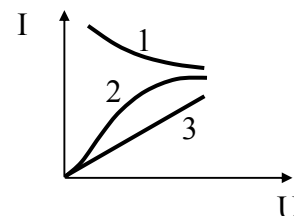


4)

10. На рисунке представлена вольтамперная характеристика (связь между напряжением и током). Укажите зависимость тока от напряжения,



соответствующую только постоянному сопротивлению



- 1) 1; 2) 2; 3) 3.

11. Электрическое сопротивление металлов и полупроводников при повышении температуры...

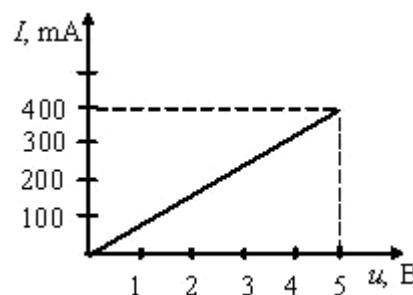
- 1) не изменяется ни у металлов, ни у полупроводников;
- 2) увеличивается у металлов и полупроводников;
- 3) уменьшается у металлов и полупроводников;
- 4) уменьшается у металлов, увеличивается у полупроводников;
- 5) увеличивается у металлов, уменьшается у полупроводников.

12. Если увеличить длину проводника и площадь его поперечного сечения вдвое, не изменяя приложенного напряжения, то плотность тока в проводнике...

- 1) уменьшится в 4 раза;
- 2) увеличится в 4 раза;
- 3) уменьшится в 2 раза;
- 4) увеличится в 2 раза.

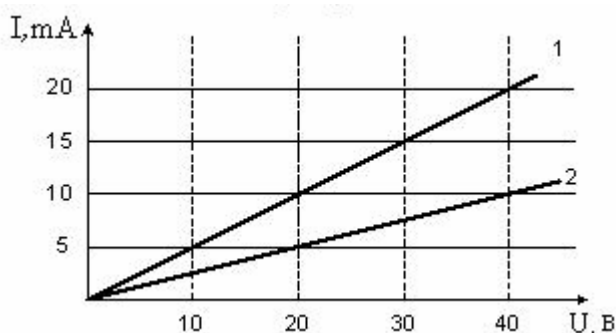
13. Вольтамперная характеристика резистора изображена на рисунке. Из графика следует, что сопротивление резистора равно...

- 1) 80 Ом;
- 2) 12,5 Ом;
- 3) 0,0125 Ом;
- 4) 0,08 Ом.



14. Вольтамперная характеристика активных элементов 1-й и 2-й цепи представлена на рисунке. Отношение сопротивлений  $\frac{R_1}{R_2}$  этих элементов равно ...

- 1) 4; 2)  $\frac{1}{4}$ ;
- 3)  $\frac{1}{2}$ ; 4) 2.



15. Птица сидит на проводе линии электропередачи, сопротивление которого  $2,5 \cdot 10^{-5}$  Ом на каждый метр длины. Если по проводу течет ток силой 2 кА, а расстояние между лапами птицы составляет 5 см, то птица находится под напряжением ...

- 1) 2,5 мВ;      2) 40 мВ;      3) 2 мкВ;      4) 0,2 В.

16. Удельное сопротивление проводника из стали  $\rho = 1,2 \cdot 10^{-7}$  Ом·м, концентрация свободных электронов  $n = 5 \cdot 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. Скорость упорядоченного движения (дрейфа) электронов в стальном проводнике в мм/с при напряженности поля  $E = 0,96$  В/м равна ...

- 1) 1 мм/с;      2) 9 мм/с;      3) 7 мм/с;      4) 3 мм/с.

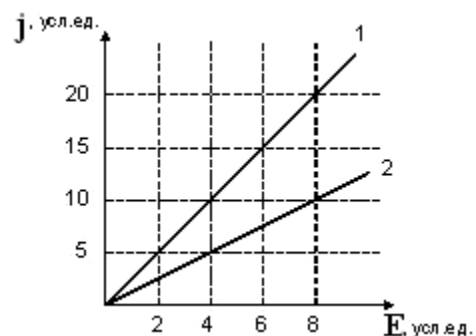
17. Напряжение на концах медного провода диаметром  $d$  и длиной  $l$  равно  $U$ . При увеличении напряжения в 4 раза средняя скорость направленного движения электронов вдоль проводника ...

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

18. Напряжение на концах медного провода диаметром  $d$  и длиной  $l$  равно  $U$ . Если взять медный провод диаметром  $2d$  той же длины  $l$  и увеличить напряжение в 4 раза, то средняя скорость направленного движения электронов вдоль проводника ...

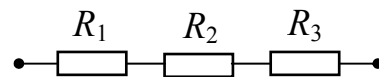
- 1) не изменится;  
2) увеличится в 4 раза;  
3) уменьшится в 4 раза;  
4) увеличится в 2 раза.

19. На рисунке представлена зависимость плотности тока  $j$ , протекающего в проводниках 1 и 2, от напряженности электрического поля  $E$ . Отношение удельных сопротивлений  $\frac{\rho_1}{\rho_2}$  этих проводников равно ...



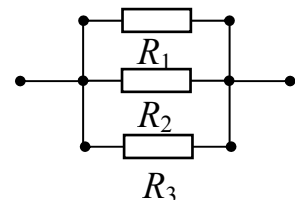
- 1) 4;      2)  $\frac{1}{4}$ ;      3)  $\frac{1}{2}$ ;      4) 2.

20. На рисунке представлено последовательное соединение трех сопротивлений  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом. Общее сопротивление  $R$  такой цепи равно



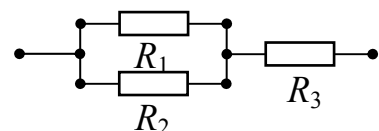
- 1)  $R = 3$  Ом;    2)  $R > 3$  Ом;    3)  $R < 3$  Ом.

21. На рисунке представлено параллельное соединение трех сопротивлений  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом. Общее сопротивление  $R$  такой цепи равно



- 1)  $R = 3$  Ом;    2)  $R > 3$  Ом;    3)  $R < 3$  Ом.

22. На рисунке представлено смешанное соединение трех сопротивлений  $R_1 = 1$  Ом,  $R_2 = 2$  Ом,  $R_3 = 3$  Ом. Общее сопротивление  $R$  такой цепи равно



- 1)  $R = 1,5$  Ом;    2)  $R = 2,5$  Ом;    3)  $R = 3,5$  Ом;    4)  $R = 3,7$  Ом.

23. Четыре сопротивления величиной каждое соединили сначала последовательно, а затем параллельно. При этом общее сопротивление...

- 1) увеличится в 4 раза;  
 2) уменьшится в 4 раза;  
 3) уменьшится в 16 раз;  
 4) увеличится в 16 раз.

24. Сторонние силы – это:

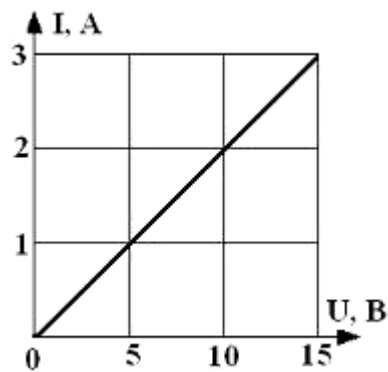
- 1) силы электрического происхождения, совершающие работу по перемещению положительных зарядов вдоль всей замкнутой цепи;  
 2) силы неэлектрического происхождения, совершающие работу по перемещению отрицательных зарядов вдоль всей замкнутой цепи;  
 3) силы неэлектрического происхождения, совершающие работу по перемещению положительных зарядов вдоль всей замкнутой цепи.

25. Электродвижущая сила (ЭДС) – это:

- 1) физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда вдоль всей замкнутой цепи, включая источник тока;  
 2) физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению положительного заряда вдоль всей замкнутой цепи, включая источник тока;  
 3) физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению положительного единичного заряда вдоль цепи.

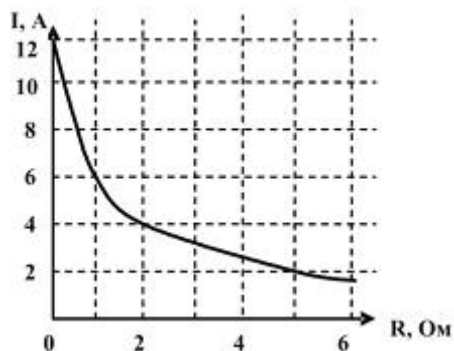
26. На рисунке представлена вольтамперная характеристика резистора, подключенного к источнику тока с ЭДС 16 В. Через резистор протекает ток 2,5 А. Внутреннее сопротивление источника тока равно...

- 1) 1;    2) 1,2;    3) 1,3;    4) 1,4.



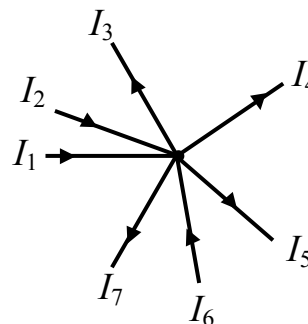
27. На рисунке представлены результаты экспериментального исследования зависимости силы тока в цепи от значения сопротивления, подключенного к источнику постоянного тока. ЭДС источника и его внутреннее сопротивление соответственно равны ...

- 1) 12 В, 1 Ом;  
2) 9 В, 0,5 Ом;  
3) 24 В, 3 Ом;  
4) 18 В, 2 Ом.



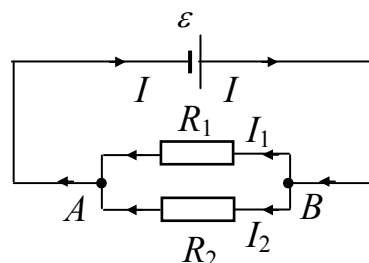
28. На рисунке изображен узел разветвленной цепи, к которому подходят проводники с соответствующими токами. Для такого узла справедливо соотношение:

- 1)  $I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 + I_6 - I_7 = 0$ ;  
2)  $I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 + I_6 - I_7 = 0$ ;  
3)  $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 + I_6 - I_7 = 0$ ;  
4)  $I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 - I_6 - I_7 = 0$ .



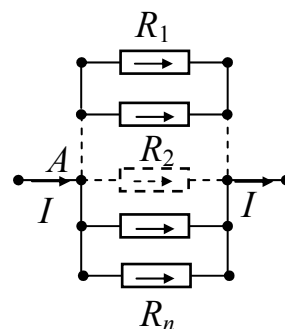
29. На рисунке представлена схема электрической цепи, состоящая из источника тока с ЭДС, равной  $\varepsilon$ , и сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Для такой замкнутой цепи в узле А справедливо соотношение:

- 1)  $I_1 + I_2 - I = 0$ ;  
2)  $I_1 + I_2 + I = 0$ ;  
3)  $I_1 - I_2 - I = 0$ ;  
4)  $I_1 - I_2 + I = 0$ .



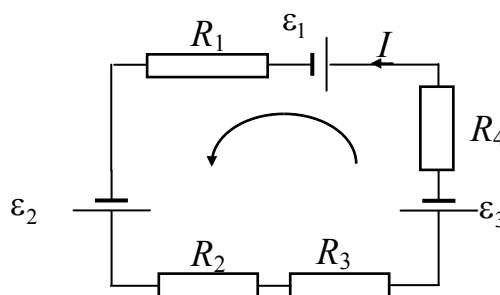
30. На рисунке изображено параллельное соединение  $n$  проводников. Для такого узла  $A$  этой цепи справедливо равенство:

- 1)  $I_1 + I_2 + \dots + I_n = I$ ;
- 2)  $I - I_1 - I_2 + \dots - I_n = 0$ ;
- 3)  $I_1 = I_2 = \dots = I_n = I$ ;
- 4)  $-I - I_1 - I_2 + \dots - I_n = 0$ .



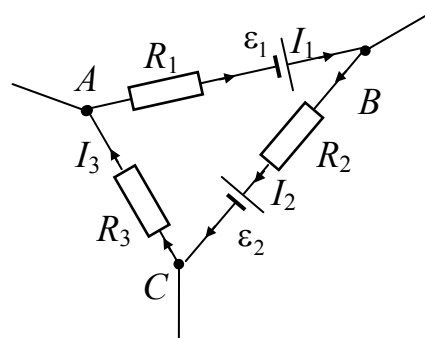
31. На рисунке представлена схема электрической цепи, состоящая из источников тока с ЭДС, равными  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ , внутренние сопротивления которых соответственно равны  $r_1 = r_2 = r_3 = r$ , и резисторов с сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3, R_4$ . Для такой замкнутой цепи справедливо соотношение:

- 1)  $U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + 3Ir = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ ;
- 2)  $U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + Ir = -\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3$ ;
- 3)  $U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + 3Ir = -\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3$ ;
- 4)  $U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + 3Ir = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_3$ .



32. На рисунке представлена схема замкнутого независимого контура, состоящая из источников тока с ЭДС равными  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  и резисторов с сопротивлениями  $R_1, R_2$ , и  $R_3$ . Используя второе правило Кирхгофа и пренебрегая внутренними сопротивлениями источников тока, укажите соотношение справедливое для данного контура:

- 1)  $I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ ;
- 2)  $I_1 R_1 - I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ ;
- 3)  $I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$ .

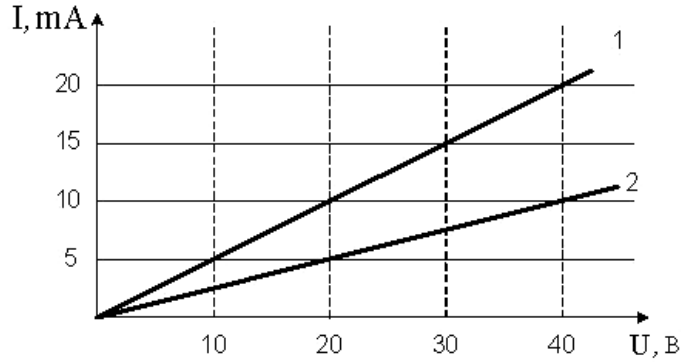


33. Напряжение на концах медного провода диаметром  $d$  и длиной  $l$  равно  $U$ . При увеличении напряжения в 4 раза удельная тепловая мощность тока ...

- 1) увеличится в 16 раз;
- 2) увеличится в 4 раза;
- 3) не изменится.

34. Вольтамперная характеристика активных элементов цепи 1 и 2 представлена на рисунке. При напряжении 20В отношение мощностей  $P_1 / P_2$  равно ...

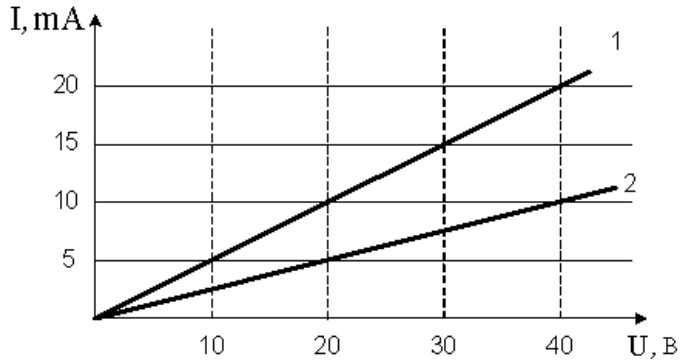
- 1) 1/2;
- 2) 1;
- 3) 2;
- 4) 4.



35. На рисунке представлена вольтамперная характеристика активных элементов 1-й и 2-й цепи.

При токе 10 мА отношение мощностей  $P_1 / P_2$  равно...

- 1) 1/2;    2) 1;
- 3) 2;    4) 4.

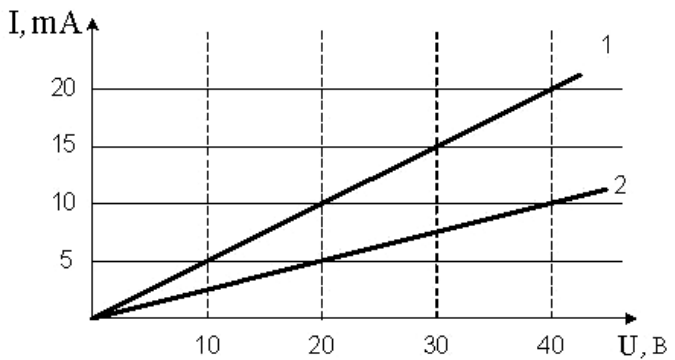


36. На рисунке представлена вольтамперная характеристика активных элементов 1-й и 2-й цепи.

А) На элементе 2 при напряжении 20 В выделяется мощность...

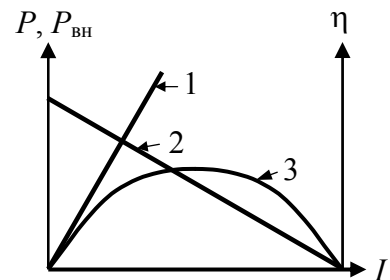
В) На элементе 1 при напряжении 30 В выделяется мощность...

- 1) 0,1 Вт;    2) 0,5 Вт;    3) 100 Вт;    4) 20 Вт.



37. На рисунке представлены графики зависимости полной мощности  $P = f(I)$ , полезной мощности (мощности во внешней цепи)  $P_n = f(I)$  и КПД источника тока  $\eta = f(I)$  от тока во внешней цепи. Какой из графиков соответствует

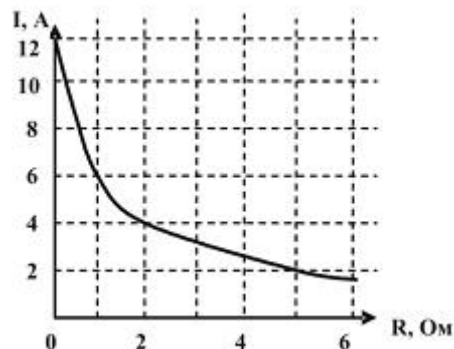
- 1) полной мощности от тока во внешней цепи;
- 2) полезной мощности от тока во внешней цепи;
- 3) зависимости КПД от тока во внешней цепи?



38. Электронагревательный прибор подключен к источнику тока с ЭДС  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ . При каком значении сопротивления  $R$  прибора полезная мощность максимальна? Каково при этом значение КПД?

- 1)  $r = R, \eta = 100\%$ ;                      2)  $r = R, \eta = 50\%$ ;  
 3)  $R \rightarrow \infty, \eta = 50\%$ ;                      4)  $R \rightarrow 0, \eta = 100\%$ .

39. К источнику тока с внутренним сопротивлением 1 Ом подключили реостат. На рисунке показан график зависимости силы тока в реостате от его сопротивления. Максимальная мощность, которая выделяется в реостате, равна...



- 1) 20 Вт; 2) 36 Вт; 3) 32 Вт; 4) 27 Вт.

40. Круглосуточно горящая в течение года лампочка мощностью 40 Вт в подъезде вашего дома при тарифе 2 руб. за 1 кВт·ч обходится в \_\_\_\_\_ рубля. Ответ округлите до целых.

- 1) 701;                      2) 500;                      3) 1200;                      4) 980.

41. Лампочки мощностью 25 Вт и 100 Вт, рассчитанные на одно и то же напряжение, соединены последовательно и включены в сеть. При этом отношение количества теплоты, выделившейся на первой и второй лампочках за одно и то же время, равно...

- 1) 1;                      2) 16;                      3) 1/4;                      4) 4.

42. Маленьким электрокипятильником можно вскипятить в автомобиле стакан воды для чая или кофе. Напряжение аккумулятора 12 В. Если он за 5 мин нагревает 200 мл воды от 10 до 100°C, то сила тока (в А), потребляемого от аккумулятора, равна ... (Удельная теплоемкость воды равна 4200 Дж/кг·К)

- 1) 21;                      2) 12,6;                      3) 0,079;                      4) 0,048.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Определите заряд, прошедший по резистору с сопротивлением 1 Ом, при равномерном возрастании напряжения на концах резистора от 1 до 3 В в течение 10 с.

Ответ:  $q = 20$  Кл.

2. Определите удельное сопротивление и материал провода, который намотан на катушку, имеющую 500 витков со средним диаметром витка 6 см, если при напряжении 300 В допустимая плотность тока  $2 \text{ А/м}^2$ .

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

3. Плотность тока в никелиновом проводнике длиной 25 м равна  $1 \text{ МА/м}^2$ . Определите напряжение на концах проводника.

Ответ:  $U = 10 \text{ В}$ .

4. Определите плотность тока в нихромовом проводнике длиной 5 м, если на концах его поддерживается разность потенциалов 2 В.

Ответ:  $j = 3,6 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$ .

5. Какой силы и плотности ток проходит по железному проводнику длиной 0,5 м и диаметром 0,6 мм? Удельное сопротивление железа  $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , а напряжение на концах проводника 1,6 В.

Ответ:  $I = 5,7 \text{ А}$ ;  $j = 2 \cdot 10^7 \text{ А/м}^2$ .

6. Имеется моток медной проволоки с площадью сечения  $0,4 \text{ мм}^2$ . Масса проволоки 0,3 кг. Определите сопротивление проволоки. Удельное сопротивление и плотность меди равны соответственно  $0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$  и  $8,6 \text{ г/см}^3$ .

Ответ:  $R = 3,7 \text{ Ом}$ .

7. Температура вольфрамовой нити электролампы  $2000^\circ\text{C}$ , диаметр 0,02 мм, сила тока в ней 4 А. Определите напряженность поля в нити.

Ответ:  $E = 8000 \text{ В/м}$ .

8. На концах никелинового проводника длиной 5 м поддерживается разность потенциалов 12 В. Определите плотность тока в проводнике, если его температура  $540^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $j = 5,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ .

9. Электрическая цепь состоит из двух последовательно соединенных проводников одинаковой длины, но различного диаметра (1 и 3 мм соответственно), сделанных из одного металла. Разность потенциалов на концах цепи 12 В. Определите падение напряжения на каждом проводнике.

Ответ:  $U_1 = 10,8 \text{ В}$ ;  $U_2 = 1,2 \text{ В}$ .



10. Внутреннее сопротивление аккумулятора 1 Ом. При силе тока 2 А его КПД равен 0,8. Определите ЭДС аккумулятора.

Ответ:  $\varepsilon = 10$  В.

11. Определите ЭДС аккумуляторной батареи, ток короткого замыкания в которой 10 А, если при подключении к ней резистора сопротивлением 9 Ом сила тока в цепи равна 1 А.

Ответ:  $\varepsilon = 10$  В.

12. ЭДС аккумулятора автомобиля 12 В. При силе тока 3 А его КПД равен 0,8. Определите внутреннее сопротивление аккумулятора.

Ответ:  $r = 0,8$  Ом.

13. Два одинаковых источника тока соединены в одном случае последовательно, в другом – параллельно и замкнуты на внешнее сопротивление 1 Ом. При каком внутреннем сопротивлении источника сила тока во внешней цепи будет в обоих случаях одинаковой?

Ответ:  $r = 1$  Ом.

14. В медном проводнике сечением  $6\text{ мм}^2$  и длиной 5 м течет ток. За 1 мин в проводнике выделяется 18 Дж теплоты. Определите напряженность электрического поля, плотность и силу тока в проводнике.

Ответ:  $E = 1,3 \cdot 10^{-2}$  В/м;  $j = 7,7 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>;  $I = 4,6$  А.

15. К источнику тока один раз подключают резистор сопротивлением  $R_1 = 1$  Ом, другой раз –  $R_2 = 4$  Ом. В обоих случаях на резисторах за одно и то же время выделяется одинаковое количество теплоты. Определите внутреннее сопротивление источника тока.

Ответ:  $r = 2$  Ом.

16. В резисторе сопротивлением 20 Ом сила тока за 5 с линейно возросла от 5 до 15 А. Какое количество теплоты выделилось за это время?

Ответ:  $Q = 10,8 \cdot 10^3$  Дж.

17. Определите ток короткого замыкания батареи, ЭДС которой 15 В, если при подключении к ней резистора сопротивлением 3 Ом сила тока в цепи 4 А.

Ответ:  $I = 20$  А.

18. Два источника тока, ЭДС которых по 2 В и внутреннее сопротивление каждого 0,5 Ом, соединены последовательно. При каком внешнем сопротивлении потребляемая полезная мощность будет максимальной?

Ответ:  $R = 1$  Ом.

19. Два источника тока, ЭДС которых по 1,5 В и внутреннее сопротивление каждого 0,5 Ом, соединены параллельно. Какое сопротивление нужно подключить к ним, чтобы потребляемая полезная мощность была максимальной?

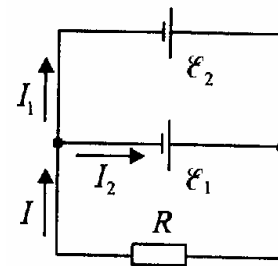
Ответ:  $R = 0,25$  Ом.

20. От батареи, ЭДС которой равна 500 В, требуется передать энергию на расстояние 2,5 км. Потребляемая мощность равна 10 кВт. Определите минимальные потери мощности в сети, если диаметр медных подводящих проводов равен 1,5 см.

Ответ:  $P = 193$  Вт.

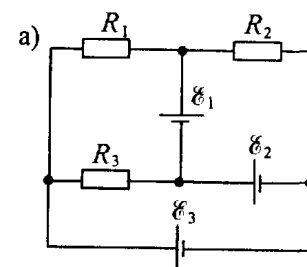
21. Два источника тока с ЭДС  $\varepsilon_1 = 2$  В и  $\varepsilon_2 = 1,5$  В и внутренними сопротивлениями  $r_1 = 0,5$  Ом и  $r_2 = 0,4$  Ом включены параллельно резистору с сопротивлением  $R = 2$  Ом. Определите силу тока через резистор.

Ответ:  $I = 0,775$  А.



22. На рисунке  $\varepsilon_1 = 10$  В,  $\varepsilon_2 = 20$  В,  $\varepsilon_3 = 40$  В, а сопротивления  $R_1 = R_2 = R_3 = R = 10$  Ом. Определите силу токов, протекающих через сопротивления  $I$  и через источники ЭДС  $I'$ . Внутренние сопротивления источников ЭДС не учитывать.

Ответ:  $I_1 = 1$  А;  $I_2 = 3$  А;  $I_3 = 2$  А;  $I'_1 = 2$  А;  $I'_2 = 0$  А;  $I'_3 = 3$  А.



## 2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ, ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ

Плотность тока  $\vec{j}$ , средняя скорость  $\langle \vec{v} \rangle$  упорядоченного движения носителей заряда и их концентрация  $n$  связаны соотношением

$$\vec{j} = en\langle \vec{v} \rangle,$$

где  $e$  – элементарный заряд.

Закон Ома в дифференциальной форме

$$I = \frac{E}{\rho},$$

где  $E$  – напряженность электрического поля в проводнике;  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме

$$w = j^2 \rho,$$

где  $w$  – объемная плотность тепловой мощности.

Законы электролиза Фарадея:

а) первый закон

$$m = kq,$$

где  $m$  – масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит электрического заряда  $q$ ;  $k$  – электрохимический эквивалент вещества.

б) второй закон

$$k = \frac{M}{FZ},$$

где  $F$  – постоянная Фарадея ( $F = 96500$  Кл/моль);  $M$  – молярная масса ионов данного вещества;  $Z$  – валентность ионов.

в) объединенный закон

$$m = \frac{M}{FZ} q = \frac{M}{FZ} It,$$

где  $I$  – сила тока, проходящего через электролит;  $t$  – время.

Подвижность ионов

$$b = \frac{\langle v \rangle}{E},$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя скорость упорядоченного движения ионов;  $E$  – напряженность электрического поля.

Закон Ома в дифференциальной форме для электролитов и газов при самостоятельном разряде в области, далекой от насыщения,

$$\vec{j} = qn(b_+ + b_-)\vec{E},$$

где  $q$  – заряд иона;  $n$  – концентрация ионов;  $b_+$  и  $b_-$  – подвижности соответственно положительных и отрицательных ионов.

Плотность тока насыщения

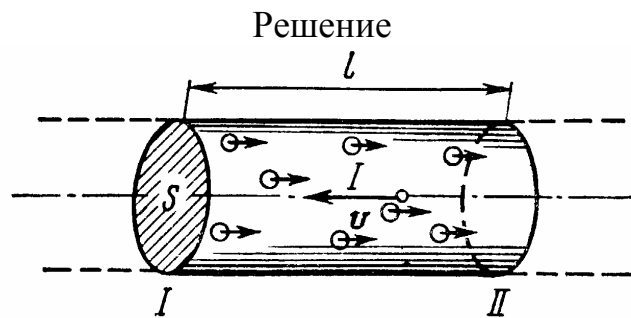
$$j_{\text{нас}} = qn_0d,$$

где  $n_0$  – число пар ионов, создаваемых ионизатором в единице объема за единицу времени;  $d$  – расстояние между электродами.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** По железному проводнику, диаметр  $d$  сечения которого равен 0,6 мм, течет ток  $I = 16$  А. Определите среднюю скорость  $\langle v \rangle$  направленного движения электронов, считая, что концентрация  $n$  свободных электронов равна концентрации  $n'$  атомов проводника.

Дано:	СИ
$d = 0,6$ мм	$0,6 \cdot 10^{-3}$ м
$I = 16$ А	
$n = n'$	
$\langle v \rangle - ?$	



Средняя скорость упорядоченного движения электронов определяется по формуле

$$\langle v \rangle = \frac{l}{t}, \quad (1)$$

где  $t$  – время, в течение которого все свободные электроны, находящиеся в отрезке проводника между сечениями I и II, пройдя через сечение II, перенесут заряд  $q = eN$  и создадут ток силой

$$I = \frac{q}{t} = \frac{eN}{t}. \quad (2)$$

Здесь  $e$  – элементарный заряд;  $N$  – число электронов в отрезке проводника;  $l$  – его длина.

Число свободных электронов в отрезке проводника объемом  $V$  можно определить по формуле

$$N = nV = nlS, \quad (3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника.

По условию задачи,  $n = n'$ . Следовательно,

$$n = n' = \frac{N_A}{V_M} = \frac{N_A}{\frac{M}{\rho}} = \frac{N_A \rho}{M}, \quad (4)$$

где  $N_A$  – постоянная Авогадро;  $V_M$  – молярный объем железа;  $M$  – молярная масса железа;  $\rho$  – плотность железа.

Подставив последовательно выражения  $n$  из формулы (4) в равенство (3) и  $N$  из формулы (3) в равенство (2), получим

$$I = \frac{N_A \rho l S e}{M t},$$

откуда

$$l = \frac{M t I}{N_A \rho S e}.$$

Подставив выражение  $l$  в формулу (1), сократив на  $t$  и выразив площадь сечения проводника через диаметр  $S = \frac{\pi d^2}{4}$ , найдем среднюю скорость направленного движения электронов

$$\langle v \rangle = \frac{I M}{N_A \rho S e}.$$

Выполним вычисления

$$\langle v \rangle = \frac{16 \cdot 56 \cdot 10^{-3}}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 7800 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,36 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 4,2 \text{ мм/с.}$$

Ответ:  $\langle v \rangle = 4,2 \text{ мм/с.}$

**Пример 2.** В цепь источника постоянного тока с ЭДС  $\varepsilon = 6 \text{ В}$  включен резистор сопротивлением  $R = 80 \text{ Ом}$ . Определите: 1) плотность тока в соединительных проводах площадью поперечного сечения  $S = 2 \text{ мм}^2$ ; 2) число  $N$  электронов, проходящих через сечение проводов за время  $t = 1 \text{ с}$ . Сопротивлением источника тока и соединительных проводов пренебречь.

	СИ	Решение
Дано: $\varepsilon = 6 \text{ В}$ $R = 80 \text{ Ом}$ $S = 2 \text{ мм}^2$ $t = 1 \text{ с}$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	Плотность тока $j = \frac{I}{S}. \quad (1)$ Силу тока выразим по закону Ома для замкнутой цепи
$j - ?;$ $N - ?$		$I = \frac{\varepsilon}{R + R_1 + r}, \quad (2)$

где  $R$  – сопротивление резистора;  $R_1$  – сопротивление соединительных проводов;  $\varepsilon$  и  $r$  – ЭДС и внутреннее сопротивление источника соответственно.

Пренебрегая сопротивлениями  $R_1$  и  $r$ , перепишем формулу (2) в виде

$$I = \frac{\varepsilon}{R}.$$

Подставив это выражение силы тока в формулу (1), получим

$$j = \frac{\varepsilon}{RS}.$$

$$j = \frac{6}{80 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 3,75 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2.$$

Число электронов, проходящих за время  $t$  через поперечное сечение, найдем, разделив заряд  $q$ , протекающий за это время через сечение, на элементарный заряд  $e$ :

$$N = \frac{q}{e},$$

или, с учетом того, что  $q = It$  и  $I = \frac{\varepsilon}{R}$ ,

$$N = \frac{It}{e} = \frac{\varepsilon t}{eR}.$$

$$N = \frac{6 \cdot 1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 80} = 4,69 \cdot 10^{17} \text{ электронов.}$$

Ответ:  $N = 4,69 \cdot 10^{17}$  электронов.

**Пример 3.** Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объем  $V = 375 \text{ см}^3$  и заполнено водородом, который частично ионизирован. Площадь пластин конденсатора  $S = 250 \text{ см}^2$ . При каком напряжении  $U$  между пластинами конденсатора сила тока  $I$ , протекающего

через конденсатор, достигнет значения 2 мкА, если концентрация  $n$  ионов обоих знаков в газе равна  $5,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ ? Принять подвижность ионов  $b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ ,  $b_- = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

Дано:	СИ	Решение
$V = 375 \text{ см}^3$	$375 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$	Напряжение $U$ на обкладках конденсатора связано с напряженностью $E$ электрического поля между обкладками и расстоянием $d$ между ними соотношением $U = Ed. \quad (1)$ Напряженность поля может быть найдена из выражения плотности тока $j = qn(b_+ + b_-)E,$ где $q$ – заряд иона.
$I = 2 \text{ мкА}$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$	
$S = 250 \text{ мм}^2$	$250 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$	
$b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		
$b_- = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$		
$n = 5,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$	
$U = ?$		

Отсюда

$$E = \frac{j}{qn(b_+ + b_-)}.$$

Расстояние  $d$  между пластинами, входящее в формулу (1), найдем по формуле

$$d = \frac{V}{S}.$$

Подставив выражения  $E$  и  $d$  в формулу (1), получим

$$U = \frac{jV}{qn(b_+ + b_-)S}.$$

Так как  $j = \frac{I}{S}$ , то  $U = \frac{IV}{qn(b_+ + b_-)S^2}.$

$$U = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 375 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^{13} (5,4 \cdot 10^{-4} + 7,4 \cdot 10^{-4}) (250 \cdot 10^{-6})^2} = 11 \cdot 10^5 \text{ В}.$$

Ответ:  $U = 11 \cdot 10^5 \text{ В}$ .

**Пример 4.** Определите скорость  $u$ , с которой растет слой никеля на плоской поверхности металла при электролизе, если плотность тока  $j$ , протекающего через электролит, равна  $30 \text{ А/м}^2$ . Никель считать двухвалентным.

Дано: $j = 30 \text{ А/м}^2$
$u - ?$

Решение  
Для решения задачи воспользуемся объединенным законом Фарадея

$$m = \frac{M}{FZ} q = \frac{M}{FZ} It. \quad (1)$$

Будем считать, что электролитическое осаждение никеля идет равномерно по всей поверхности металла. Тогда массу никеля  $m$ , выделившегося за время  $t$ , можно выразить через плотность  $\rho$  никеля, площадь  $S$  поверхности металла и толщину  $h$  слоя никеля

$$m = \rho Sh. \quad (2)$$

Силу тока  $I$  выразим через плотность тока  $j$  и площадь  $S$  поверхности металла:

$$I = jS. \quad (3)$$

Подставив в формулу (1) выражения для массы (2) и силы тока (3), получим

$$\rho Sh = \frac{M}{FZ} jSt, \text{ или } \rho h = \frac{M}{FZ} jt. \quad (4)$$

При неизменной плотности тока нарастание слоя никеля будет происходить с постоянной скоростью  $u$ , определяемой отношением толщины слоя, наращенного за некоторый интервал времени, к величине этого интервала ( $u = \frac{h}{t}$ ).

Тогда из формулы (4) следует, что  $u = \frac{jM}{\rho FZ}$ .

Так как  $F = 96500 \text{ Кл/моль}$ ,  $M = 58,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ ,  $Z = 2$ ,  $\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$ , то

$$u = \frac{30 \cdot 58,7 \cdot 10^{-3}}{8800 \cdot 96500 \cdot 2} = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$$

Ответ:  $u = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$

### Тесты

1. Электролиз – это совокупность электрохимических процессов, происходящих на электродах, погруженных в электролит, при прохождении по нему электрического тока. В результате:

1) на аноде происходит электрохимическое окисление – отрицательно заряженные ионы становятся нейтральными атомами и выделяются из

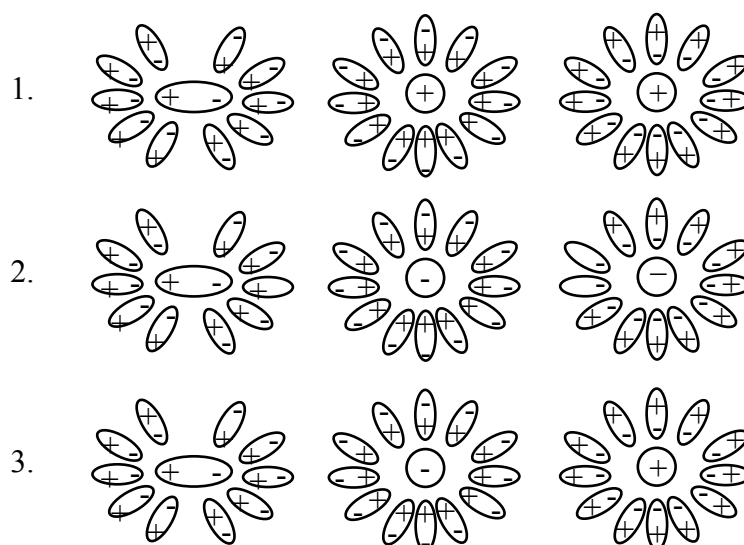


раствора, а на катоде – восстановительная реакция: положительные ионы получают недостающие электроны;

2) на аноде происходит восстановительная реакция: положительные ионы получают недостающие электроны, а на катоде происходит электрохимическое окисление – отрицательно заряженные ионы становятся нейтральными атомами и выделяются из раствора;

3) вещества, входящие в состав электролита, выделяются в свободном виде.

2. На рисунке представлен один из возможных процессов электролитической диссоциации. Какой из представленных рисунков отображает существо электролитической диссоциации:



1) 1; 2) 2; 3) 3.

3. Первый закон электролиза (первый закон Фарадея): «Масса  $m$  выделившегося на электроде вещества:

1) пропорциональна только времени  $t$  прохождения через электролит тока  $I$ »;

2) пропорциональна только силе тока  $I$ , проходящего через электролит»;

3) пропорциональна времени  $t$  прохождения через электролит тока и силе тока  $I$ ».

4. Второй закон электролиза (второй закон Фарадея): «Электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален его химическому эквиваленту». Укажите соотношение, справедливое для данного утверждения:

$$1) k = \frac{1}{F} \frac{M}{Z}; \quad 2) k = \frac{1}{F} \frac{M}{e}; \quad 3) k = \frac{1}{F} M.$$

5. Закон Ома для электролитов:  $j = eZn(b_+ + b_-)E$ , где:

1)  $\gamma = eZn(b_+ + b_-)$  – удельная электрическая проводимость раствора электролита;

2)  $\gamma = eZn(b_+ + b_-)$  – удельная электрическое сопротивление раствора электролита;

3)  $b_+$  и  $b_-$  – подвижность ионов электролита;

4)  $b_+$  и  $b_-$  – средняя скорость упорядоченного движения ионов электролита.

6. Ионизация газа – это процесс:

1) вырывания из электронной оболочки атома одного электрона под влиянием различных факторов (высоких температур, рентгеновских, ультрафиолетовых и космических лучей, радиоактивных излучений, в результате столкновений атома с электронами и другими быстрыми частицами);

2) вырывания из электронной оболочки атома одного или нескольких электронов под влиянием различных факторов (высоких температур, рентгеновских, ультрафиолетовых и космических лучей, радиоактивных излучений, в результате столкновений атома с электронами и другими быстрыми частицами);

3) вырывания из атома одного или нескольких положительных зарядов под влиянием различных факторов (высоких температур, рентгеновских, ультрафиолетовых и космических лучей, радиоактивных излучений, в результате столкновений атома с электронами и другими быстрыми частицами).

7. Рекомбинация атомов – это процесс:

1) соединения положительных ионов с отрицательными ионами после прекращения действия ионизатора, в результате которого образуются нейтральные атомы;

2) соединения положительных ионов с отрицательными ионами или электронами после прекращения действия ионизатора, в результате которого образуются нейтральные атомы;

3) соединения положительных ионов с отрицательными ионами или электронами после прекращения действия ионизатора, в результате которого образуются ионы.

8. Уравнение баланса ионов в газе имеет вид:  $\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2$ , где  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации ионов разных знаков;  $N$  – число пар ионов

разных знаков;  $n$  – концентрация пар положительных и отрицательных ионов. В стационарном состоянии концентрация ионов:

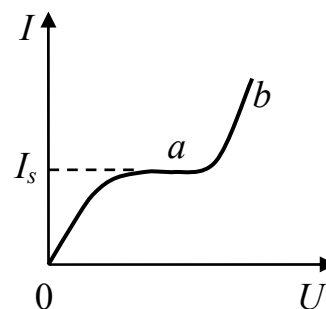
$$1) n = \alpha\sqrt{N}; \quad 2) n = N\sqrt{\alpha}; \quad 3) n = \sqrt{N\alpha}.$$

9. Уравнение баланса ионов в газе имеет вид:  $\frac{dn}{dt} = N - \alpha n^2$ , где  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации ионов разных знаков;  $N$  – число пар ионов разных знаков;  $n$  – концентрация пар положительных и отрицательных ионов. При выключении ионизатора концентрация ионов связана с коэффициентом рекомбинации соотношением:

$$1) \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \alpha t; \quad 2) \frac{1}{n} - \frac{1}{N_0} = \alpha t; \quad 3) \alpha = \left( \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} \right) \frac{1}{t}.$$

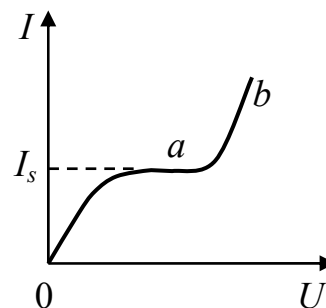
10. На рисунке представлена вольтамперная характеристика для данной интенсивности ионизатора. Если в одном из режимов, изображенных ветвью характеристики  $Oa$ , прекратить действие ионизатора, то ток в газовом промежутке:

- 1) прекратится;
- 2) возрастет;
- 3) уменьшится в два раза.



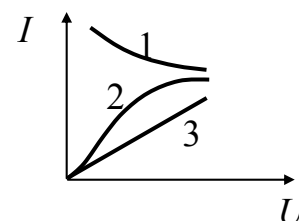
11. На рисунке представлена вольтамперная характеристика для данной интенсивности ионизатора. Возрастание тока на участке  $ab$  объясняется:

- 1) только увеличением напряжения;
- 2) только появлением новых ионов в газовом промежутке;
- 3) увеличением напряжения и появлением новых ионов в газовом промежутке.



12. На рисунке представлена вольтамперная характеристика (связь между напряжением и током). Укажите зависимость тока от напряжения, соответствующую сопротивлению в газоразрядной лампе.

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.

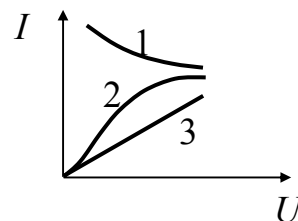


13. Ток в вакууме представляет собой:

- а) микроскопические ионы, движущиеся независимо от макроскопических тел в вакууме;
- б) микроскопические ионы, движение которых зависит от макроскопических тел в вакууме;
- в) микроскопические электроны, движущиеся независимо от макроскопических тел в вакууме.

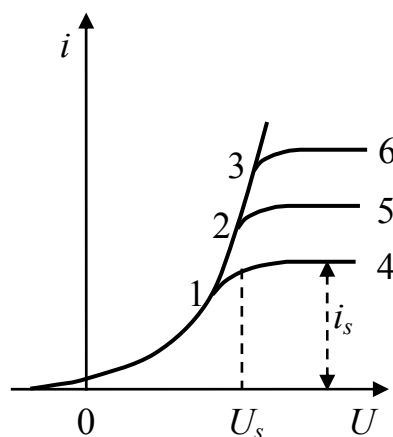
14. На рисунке представлена вольтамперная характеристика (связь между напряжением и током). Укажите зависимость тока от напряжения, соответствующую сопротивлению электронной лампы:

- 1) 1;
- 2) 2;
- 3) 3.



15. На рисунке представлена зависимость силы тока между двумя электродами (анодом и катодом в вакуумном диоде) от разности потенциалов (анодного напряжения). Какая из кривых соответствует

- 1) независимости силы тока от температуры?
- 2) зависимости силы тока от температуры?
- 3) при значениях тока, меньших  $i_s$ , зависимость силы тока от напряжения при всех температурах изображается одной и той же кривой.



### Задачи для самостоятельного решения

1. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов в медном проводнике, площадь поперечного сечения которого  $S = 4 \text{ мм}^2$ , при силе тока  $I = 1 \text{ А}$ , предполагая, что концентрация свободных электронов равна концентрации атомов проводника. Заряд электрона  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ , плотность меди  $\rho = 8900 \text{ кг/м}^3$ , молярная масса меди  $M = 63,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ .

Ответ:  $\langle v \rangle = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ .

2. Плотность тока  $j$  в алюминиевом проводе равна  $1 \text{ А/мм}^2$ . Определите среднюю скорость  $\langle v \rangle$  упорядоченного движения электронов, предполагая, что число свободных электронов в  $1 \text{ см}^3$  алюминия равно числу атомов.

Ответ:  $\langle v \rangle = 0,1 \text{ мм/с}$ .

3. Плотность тока  $j$  в медном проводнике равна  $3 \text{ А/мм}^2$ . Определите напряженность  $E$  электрического поля в проводнике.

Ответ:  $E = 0,05 \text{ В/м}$ .

4. В медном проводнике длиной  $l = 2 \text{ м}$  и площадью  $S$  поперечного сечения, равной  $0,4 \text{ мм}^2$ , идет ток. При этом каждую секунду выделяется количество теплоты  $Q = 0,35 \text{ Дж}$ . Сколько электронов  $N$  проходит за  $1 \text{ с}$  через поперечное сечение этого проводника?

Ответ:  $N = 1,27 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$ .

5. В медном проводнике объемом  $V = 6 \text{ см}^3$  при прохождении по нему постоянного тока за время  $t = 1 \text{ мин}$  выделилось количество теплоты  $Q = 216 \text{ Дж}$ . Вычислите напряженность  $E$  электрического поля в проводнике.

Ответ:  $E = 0,1 \text{ В/м}$ .

6. При силе тока  $I = 5 \text{ А}$  за время  $t = 10 \text{ мин}$  в электролитической ванне выделилось  $m = 1,02 \text{ г}$  двухвалентного металла. Определите его относительную атомную массу  $A_r$ .

Ответ:  $A_r = 65,4$ .

7. Две электролитические ванны соединены последовательно. В первой ванне выделилось  $m_1 = 3,9 \text{ г}$  цинка, во второй за то же время  $m_2 = 2,24 \text{ г}$  железа. Цинк двухвалентен. Определите валентность железа.

Ответ:  $Z = 3$ .

8. Электролитическая ванна с раствором медного купороса присоединена к батарее аккумуляторов с ЭДС  $\varepsilon = 4 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $r = 0,1 \text{ Ом}$ . Определите массу  $m$  меди, выделившейся при электролизе за время  $t = 10 \text{ мин}$ , если ЭДС поляризации  $\varepsilon_n = 1,5 \text{ В}$  и сопротивление  $R$  раствора равно  $0,5 \text{ Ом}$ . Медь двухвалентна.

Ответ:  $m = 0,83 \text{ г}$ .

9. Определите толщину  $h$  слоя меди, выделившейся за время  $t = 5 \text{ ч}$  при электролизе медного купороса, если плотность тока  $j = 80 \text{ А/м}^2$ .

Ответ:  $h = 54 \text{ мкм}$ .

10. Сила тока, проходящего через электролитическую ванну с раствором медного купороса, равномерно возрастает в течение времени

$\Delta t = 20$  с от  $I_0 = 0$  до  $I = 2$  А. Определите массу  $m$  меди, выделившейся за это время на катоде ванны.

Ответ:  $m = 6,6$  мг.

11. В электролитической ванне через раствор прошел заряд  $q = 193$  кКл. При этом на катоде выделился металл количеством вещества  $\nu = 1$  моль. Определите валентность  $Z$  металла.

Ответ:  $Z = 2$ .

12. Определите количество вещества  $\nu$  и число атомов  $N$  двухвалентного металла, отложившегося на катоде электролитической ванны, если через раствор в течение времени  $t = 5$  мин шел ток силой  $I = 2$  А.

Ответ:  $\nu = 3,12$  моль;  $N = 1,87 \cdot 10^{21}$ .

13. Сколько атомов двухвалентного металла выделится на  $1$  см<sup>2</sup> поверхности электрода за время  $t = 5$  мин при плотности  $j = 10$  А/м<sup>2</sup>?

Ответ:  $N = 9,3 \cdot 10^{17}$ .

14. Энергия ионизации атома водорода  $E_i = 2,18 \cdot 10^{-18}$  Дж. Определите потенциал ионизации  $U_i$  водорода.

Ответ:  $U_i = 13,6$  В.

15. Ток насыщения при несамостоятельном разряде  $I_{\text{нас}} = 6,4$  пА. Найдите число пар ионов, создаваемых за 1 с внешним ионизатором.

Ответ:  $n = 2 \cdot 10^7$ .

16. Объем  $V$  газа, заключенного между электродами ионизационной камеры, равен  $0,5$  л. Газ ионизируется рентгеновским излучением. Сила тока насыщения  $I_{\text{нас}} = 4$  нА. Сколько пар ионов образуется за 1 с в  $1$  см<sup>3</sup> газа? Заряд каждого иона равен элементарному заряду.

Ответ:  $n = 5 \cdot 10^7$ .

17. В ионизационной камере, расстояние  $d$  между плоскими электродами которой равно  $5$  см, проходит ток насыщения плотностью  $j = 16$  мкА/м<sup>2</sup>. Определите число  $n$  пар ионов, образующихся каждым кубическом сантиметре пространства камеры в 1 с.

Ответ:  $n = 2 \cdot 10^9$ .

18. Найдите силу тока насыщения между пластинами конденсатора, если под действием ионизатора в каждом кубическом сантиметре пространства между пластинами конденсатора ежесекундно образуется  $n_0 = 10^8$  пар ионов, каждый из которых несет один элементарный заряд. Расстояние  $d$  между пластинами конденсатора равно 1 см, площадь  $S$  пластины равна  $100 \text{ см}^2$ .

Ответ:  $I_{\text{нас}} = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ .

19. Азот ионизируется рентгеновским излучением. Определите проводимость  $G$  азота, если в каждом кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия  $n_0 = 10^7$  пар ионов. Подвижность положительных ионов  $b_+ = 1,27 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , отрицательных  $b_- = 1,81 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ .

Ответ:  $G = 0,5 \text{ нСм}$ .

20. Воздух между плоскими электродами ионизационной меры ионизируется рентгеновским излучением. Сила тока  $I$ , текущего через камеру, равна  $1,2 \text{ мкА}$ . Площадь  $S$  каждого электрода равна  $300 \text{ см}^2$ , расстояние между ними  $d = 2 \text{ см}$ , разность потенциалов  $U = 100 \text{ В}$ . Найдите концентрацию  $n$  пар ионов между пластинами, если ток далек от насыщения. Подвижность положительных ионов  $b_+ = 1,4 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ , отрицательных  $b_- = 1,9 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ . Заряд каждого иона равен элементарному заряду.

Ответ:  $n = 1,52 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}$ .

21. Потенциал ионизации  $U_i$  атомарного водорода равен  $13,6 \text{ В}$ . Определите температуру, при которой атомы имеют среднюю кинетическую энергию поступательного движения, достаточную для ионизации.

Ответ:  $T = 105 \text{ кК}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физика способствует развитию других наук, которые широко пользуются ее методами. Возникли новые отрасли этих наук, такие, как, например, астрофизика, химическая физика, биофизика и другие. Наконец, достижения физики открывают огромные возможности для технического прогресса.

Цель обучения физике в вузе заключается не в том, чтобы дать студенту необходимый объем знаний, а в том, чтобы научить его умению самостоятельно ставить и решать физические вопросы.

В сборнике представлены задачи, многие из которых приближены к реальным физическим проблемам, связанным с решением технических задач. При решении большинства задач требуется не только формальное знание законов, но и достаточно широкий кругозор в области физики. Большинство задач ориентировано на получение численного ответа, так как именно он является важным критерием разумности получаемых результатов, приближает задачу к реальной практической ситуации.

Учебный процесс не может осуществляться без обратной связи, которая реализуется с помощью контроля за его ходом. В данном учебном пособии предлагается набор единых тестов, позволяющих осуществлять контроль качества учебной работы студентов при освоении ими требований ГОС и рабочей программы.

Автор будет благодарен всем, кто внимательно отнесется к данному пособию и выскажет определенные пожелания и замечания по существу. Кроме того, он постарается учесть все рациональные замечания со стороны коллег – физиков, студентов – и внести соответствующие исправления и дополнения.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дмитриева, В.Ф. Основы физики [Текст] / В.Ф. Дмитриева, В.Л. Прокофьев. – М.: Высшая школа, 2009. – 526 с.
2. Волькенштейн, В.С. Сборник задач по общему курсу физики [Текст] / В.С. Волькенштейн. – М.: Наука, 2008. – 478 с.
3. Коган, Л.М. Учись решать задачи по физике [Текст] / Л.М. Коган. – М.: Высшая школа, 1993. – 368 с.
4. Трофимова, Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями [Текст] / Т.И. Трофимова, З.Г. Павлова. – М.: Абрис, 2012. – 312 с.
5. Яворский, Б.М. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов [Текст] / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф, А.К. Лебедев. – М.: Оникс, Мир и образование, 8-е издание, 2006. – 524 с.
6. Задачник по физике [Текст] / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2001. – 640 с.
7. Иродов, И.Е. Задачи по общей физике [Текст] / И.Е. Иродов. – СПб.: Лань, 2007.
8. Детлаф, А.А. Курс физики [Текст] / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – М.: Академия, 2007. – 534 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Т а б л и ц а 1

Основные физические постоянные (округленные значения)

Физическая постоянная	Обозначение	Значение
Ускорение свободного падения	$g$	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	$G$	6,67·10 <sup>-11</sup> м <sup>3</sup> /(кг·с <sup>2</sup> )
Постоянная Авогадро	$N_A$	6,02·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Молярная газовая постоянная	$R$	8,31 Дж/(моль·К)
Стандартный объем	$V_M$	22,4·10 <sup>-3</sup> м <sup>3</sup> /моль
Постоянная Больцмана	$k$	1,38·10 <sup>-23</sup> Дж/К
Элементарный заряд	$e$	1,60·10 <sup>-19</sup> Кл
Скорость света в вакууме	$c$	3,00·10 <sup>8</sup> м/с
Постоянная Планка	$h$	6,63·10 <sup>-34</sup> Дж·с
Радиус Бора	$r_0$	0,529·10 <sup>-10</sup> м
Магнетон Бора	$\mu_B$	0,927·10 <sup>-23</sup> А/м <sup>2</sup>
Энергия ионизации атома водорода	$E_i$	2,18·10 <sup>-18</sup> Дж
Атомная единица массы	а. е. м.	1,660·10 <sup>-27</sup> кг
Электрическая постоянная	$\epsilon_0$	8,85·10 <sup>-12</sup> Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0$	4π·10 <sup>-7</sup> Гн/м

Т а б л и ц а 2

Относительные атомные массы (округленные значения)  $A_r$   
и порядковые номера  $Z$  некоторых элементов

Элемент	Символ	$A_r$	$Z$	Элемент	Символ	$A_r$	$Z$
Азот	N	14	7	Марганец	Mn	55	25
Алюминий	Al	27	13	Медь	Cu	64	29
Аргон	Ar	40	18	Молибден	Mo	96	42
Барий	Ba	137	56	Натрий	Na	23	11
Ванадий	V	60	23	Неон	Ne	20	10
Водород	H	1	1	Никель	Ni	59	28
Вольфрам	W	184	74	Олово	Sn	119	50
Гелий	He	4	2	Платина	Pt	195	78
Железо	Fe	56	26	Ртуть	Hg	201	80
Золото	Au	197	79	Сера	S	32	16
Калий	K	39	19	Серебро	Ag	108	47
Кальций	Ca	40	20	Углерод	C	12	6
Кислород	O	16	8	Уран	U	238	92
Магний	Mg	24	12	Хлор	Cl	35	17

Т а б л и ц а 3

## Свойства некоторых твердых тел

Твердое тело	Плотность, $\cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, кДж/кг	Удельное электрическое сопротивление, $\cdot 10^{-6}$ Ом·м
Алюминий	2,70	660	0,896	322	0,025
Дуб	0,8	-	2,39	-	-
Железо	7,8	1535	0,465	272	0,087
Золото	19,3	1063	0,130	65,7	2,2
Латунь	8,6	920	0,386	-	-
Лед	0,9	0	2,09	335	-
Медь	8,9	1083	0,385	205	0,017
Олово	7,2	232	0,218	59,6	0,12
Платина	21,5	1770	0,134	113	0,107
Пробка	0,2	-	2,05	-	-
Свинец	11,3	327	0,13	23	0,208
Серебро	10,5	960	0,234	105	0,016
Сталь	7,7	1500	0,460	-	-
Цинк	7,1	420	0,391	117	0,059

Т а б л и ц а 4

## Электрическое поле в атмосфере Земли

Высота, км	0	0,5	1,5	3	6	12
Напряженность, В/м	130	50	30	20	10	2,5

П р и м е ч а н и я :

1. Величина заряда грозового облака равна 10–20 Кл (в отдельных случаях достигает 300 Кл).
2. Средняя поверхностная плотность заряда Земли равна  $-1,15 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>2</sup>. Заряд всей Земли  $-5,7 \cdot 10^5$  Кл.

Т а б л и ц а 5

## Некоторые параметры электроизолирующих материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Пробивная напряжённость, кВ/м	Плотность, $10^3$ кг/м <sup>3</sup>	Удельное сопротивление, Ом·м
Асбест	–	2	2,3–2,6	2
Бакелит	4–4,6	10–40	1,2	–
Берёза сухая	3–4	40–60	0,7	–
Битум	2,6–3,3	6–15	1,2	–
Винипласт (П)	4,1	15	–	–
Воск пчелиный	2,8–2,9	20–35	0,96	$2 \cdot 10^4$ – $2 \cdot 10^9$
Гетинакс (П)	5–6,5	10–30	1,3	–
Канифоль	3,5	–	1,1	$5 \cdot 10^{10}$
Карболит (П)	–	10–14,5	1,2–1,3	–
Мрамор	8–10	6–10	2,7	$1 \cdot 10^4$
Парафин	2,2–2,3	20–30	0,4–0,9	$3 \cdot 10^{12}$
Плексиглас	3,0–3,6	18,5	1,2	–
Полистирол	2,2–2,8	25–50	1,05–1,65	$5 \cdot 10^9$ – $5 \cdot 10^{11}$
Полихлорвинил	3,1–3,5	50	1,38	–
Резина мягкая	2,6–3	15–25	1,7–2,0	$4 \cdot 10^7$
Слюда флогопит	4–5,5	60–125	2,5–2,7	$10^7$ – $10^{11}$
Стекло	4–10	20–30	2,2–4,0	$10^5$ – $10^8$
Текстолит	7	2–8	1,3–1,4	–
Фарфор электротехнический	6,5	20	2,4	$3 \cdot 10^8$
Фторопласт	2,5–2,7	–	2,14	$1,2 \cdot 10^{12}$
Целлулоид	3–4	30	–	$2 \cdot 10^4$
Шелк натуральный	4–5	–	–	–
Шеллак	3,5	50	1,02	$1 \cdot 10^{10}$
Шифер	6–7	5–14	2,6–2,9	$1 \cdot 10^2$
Эбонит (КП)	4–4,5	25	1,3	$1 \cdot 10^{12}$
Янтарь	2,7–2,9	20–30	1,06–1,11	$1 \cdot 10^{12}$

П р и м е ч а н и я : 1. Пробивная напряжённость – это максимально допустимое значение напряжённости; при напряжённости больше допустимого значения диэлектрик пробивается. 2. Указанные в скобках буквы означают: П – пластмасса; К – керамика; КП – каучуковая пластмасса. 3. Приведенные значения диэлектрической проницаемости относятся к температурам 18–20 °С. Диэлектрическая проницаемость твердых тел мало изменяется с температурой, за исключением сегнетоэлектриков.

Т а б л и ц а 6

## Некоторые свойства сегнетоэлектрических кристаллов

Кристалл	Температура Кюри, °К	Спонтанная поляризация, (СГСЭ)	Диэлектрическая проницаемость
NaK(C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>6</sub> )·4H <sub>2</sub> O (сегнетова соль)	297(верх.) 255(нижн.)	800	~9000
NaK(C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> D <sub>2</sub> O <sub>6</sub> )·4D <sub>2</sub> O	308(верх.) 349(нижн.)	–	–
LiNH <sub>4</sub> (C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> )·H <sub>2</sub> O	106	630	–
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (дигидрофос- фат калия)	123	16000	~10 <sup>5</sup>
KD <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	218	18000	–
KH <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub>	96,5	–	–
NH <sub>4</sub> H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> (дигидрофос- фат аммония)	~398	–	90
BaTiO <sub>3</sub> (титанат бария) KNbO <sub>3</sub> (ниобат калия)	391	48000	~10 <sup>4</sup>
NaNbO <sub>3</sub>	708	78000	
LiTiO <sub>3</sub>	913	70000	

П р и м е ч а н и я . 1. Сегнетоэлектрики разбиты на три группы по особенностям их химических формул.

2. Для некоторых сегнетоэлектриков их свойства проявляются в определенной области температур. В этих случаях указываются верхнее и нижнее значения температуры Кюри.

3. Приведены максимальные значения диэлектрической проницаемости.

4. Символ D обозначает тяжелый водород (дейтерий).

5. Для пересчета значений спонтанной поляризации в систему СИ приведенные значения надо умножить на  $3,3 \cdot 10^{-12}$ .

Т а б л и ц а 7

Удельное сопротивление и температурный коэффициент  
сопротивления металлов

Металл	Удельное сопротивление при 20 °С, 10 <sup>-6</sup> Ом·м	Температурный коэффициент при 20 °С
Алюминий	0,028	0,0049
Бронза фосфористая	0,015	0,0040
Вольфрам	0,055	0,0045
Железо	0,098	0,0062
Латунь	0,025-0,06	0,002-0,007
Медь	0,0175	0,0039
Молибден	0,057	0,0033
Никель	0,100	0,0050
Олово	0,115	0,0042
Ртуть	0,958	0,0009
Свинец	0,221	0,0041
Серебро	0,016	0,0036
Тантал	0,155	0,0031
Хром	0,027	-
Цинк	0,059	0,0035

П р и м е ч а н и я . 1. Указанные в таблице значения являются средними. Их величина для различных образцов зависит от степени чистоты, термообработки и т.д.

2. Температурный коэффициент сопротивления чистых металлов близок к 0,00367 град<sup>-1</sup>.

Т а б л и ц а 8

Сплавы с высоким омическим сопротивлением

Сплавы (состав в %)	Удельное сопротивление при 20 °С, 10 <sup>-6</sup> Ом·м	Температурный коэффициент, (0–100 °С)	Максимальная рабочая температура, °С
Константан (58,8 Cu, 40 Ni, 1,2 Mn)	0,44–0,52	0,00001	500
Манганин (85 Cu, 12 Mn, 3 Ni)	0,42–0,48	0,00003	100
Нейзильбер (65 Cu, 20 Zn, 15 Ni)	0,28–0,35	0,00004	150–200
Никелин (54 Cu, 20 Zn, 26 Ni)	0,39–0,45	0,00002	150–200
Нихром (67,5 Ni, 15 Cr, 16 Fe, 1,5 Mn)	1,0–1,1	0,0002	1000
Реотан (84 Cu, 12 Mn, 4 Zn)	0,45–0,52	0,0004	150–200
Фехраль (80 Fe, 14 Cr, 6 Al)	1,1–1,3	0,0001	900

П р и м е ч а н и е . Значение температурного коэффициента сопротивления для константана изменяется от –0,00004 до +0,00001 в зависимости от образца. Минус при температурном коэффициенте означает, что с увеличением температуры сопротивление уменьшается.

Т а б л и ц а 9

Электрохимические эквиваленты

Ион	Число граммов в 1 грамм-эквиваленте	$k$ , мг/к	Ион	Число граммов в 1 грамм-эквиваленте	$k$ , мг/к
H <sup>+</sup>	1,008	0,0104	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	30,0	0,3108
O <sup>2-</sup>	8,0	0,0829	Cu <sup>2+</sup>	31,8	0,3297
Al <sup>3+</sup>	9,0	0,0936	Zn <sup>2+</sup>	32,7	0,3387
OH <sup>-</sup>	17,0	0,1762	Cl <sup>-</sup>	35,5	0,3672
Fe <sup>3+</sup>	18,6	0,1930	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	48,0	0,4975
Ca <sup>2+</sup>	20,1	0,2077	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	62,0	0,642
Na <sup>+</sup>	23,0	0,2388	Cu <sup>+</sup>	63,6	0,6590
Fe <sup>2+</sup>	27,8	0,2895	Ag <sup>+</sup>	107,9	1,118

П р и м е ч а н и е . Число плюсов или минусов у символов показывает число элементарных зарядов, переносимых одним ионом.

Таблица 10

Температура перехода некоторых металлов, сплавов и соединений в сверхпроводящее состояние

Вещество	Температура перехода, °К	Вещество	Температура перехода, °К
<b>Металлы</b>		<b>Сплавы</b>	
Цирконий	0,3	Bi-Pt	0,16
Кадмий	0,6	Pb-Au	2,0-7,3
Цинк	0,8	Sn-Zn	3,7
Алюминий	1,2	Pb-Hg	4,1-7,3
Олово	3,7	Sn-Hg	4,2
Ртуть	4,1	Pb-Ag	5,8-7,3
Тантал	4,4	Pb-Sb	6,6
Свинец	7,3	Pb-Ca	7,0
Ниобий	9,2		
<b>Соединения</b>			
NiBi	4,2	Nb <sub>2</sub> C	9,2
PbSe	5,0	NbC	10,1-10,5
SrBi <sub>2</sub>	5,5	NbN	15-16
NbV	6	V <sub>3</sub> Si	17,1
MoC	7,6-8,3	Nb <sub>3</sub> Sn	18

Примечания. 1. Имеется несколько сверхпроводящих сплавов с большим числом компонент: металл Розе (8,5 К), Ньютона (8,5 К), Вуда (8,2 К), Pb-As-Bi (9,0 К), Pb-As-Bi-Sb (9,0 К).

2. Сопротивление у соединений и сплавов при переходе к сверхпроводимости изменяется в значительном интервале температур (иногда около 2 К). Кроме того, температура перехода зависит от способа термической обработки сплава или соединения. В таких случаях в таблице указаны границы изменения температуры перехода.



Т а б л и ц а 11

## Свойства важнейших полупроводников

Вещество	Температура плавления, °С	Ширина запрещенной зоны, эВ	Подвижность электронов, $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^7 \text{ В}$	Подвижность дырок, $10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^7 \text{ В}$
В	2300	1,1	10	10
С-графит	-	0,1	-	-
С-алмаз		6-7	1800	1200
Si	1414	1,12	1900	500
Ge	958	0,75	3900	1900
Sn-серое	-	0,08	3000	-
S	113	2,4	-	-
Se-серый	220	2,3	-	-
Te	452	0,36	1700	1200
J	113,5	1,3	25	-
Ag <sub>2</sub> Te	955	0,17	4000	-
HgTe	670	0,2	10000	100
B <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	585	0,25	600	150
Mg <sub>2</sub> Sn	778	0,36	200	150
PbSe	1065	0,5	1400	1400
ZnTe	1240	0,6	100	-
PbS	1114	1,2	650	800
AgBr	430	1,35	35	-
CdTe	1045	1,45	450	100
Cu <sub>2</sub> O	1232	1,5-1,8	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	2,5	-	-
ZnO	1975	3,2	200	-

П р и м е ч а н и е . Ширина запрещенной зоны для металлов имеет порядок 0,1 эВ, для изоляторов – свыше 10 эВ.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
<b>1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА</b> .....	<b>5</b>
1.1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ. ЗАКОН КУЛОНА .....	5
1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	13
1.3. ПОТЕНЦИАЛ. ЭНЕРГИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ. РАБОТА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДА В ПОЛЕ .....	29
1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ.....	45
1.5. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ .....	56
<b>2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК</b> .....	<b>70</b>
2.1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	70
2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ, ЖИДКОСТЯХ И ГАЗАХ.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	104
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	105
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	106



Учебное издание

Очкина Наталья Александровна

**СБОРНИК ТЕСТОВ И ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ.  
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ. Часть 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**  
Учебное пособие

Под общ. ред. Г.И. Грейсуха

Р е д а к т о р      Н.Ю. Шалимова  
В е р с т к а      Н.А. Сазонова

---

Подписано в печать 9.10.2014. Формат 60×84/16.  
Бумага офисная «Снегурочка». Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 7.25. Тираж 80 экз.  
Заказ №334.



---

Издательство ПГУАС.  
440028, г.Пенза, ул. Германа Титова, 28.