

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Костанайский государственный университет им. А.Байтурсынова
Кафедра электроэнергетики и физики

А.Ю. Валентова

МНОГОВАРИАНТНЫЕ ЗАДАЧИ ПО ФИЗИКЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Учебно-методическое пособие

Костанай, 2019

УДК 530.1

ББК 22.3

В 15

Рецензенты:

Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и информационных технологий Костанайского социально – технического университета им. академика Зулкарнай Алдамжар

Поезжалов Владимир Михайлович, кандидат физико – математических наук, профессор КГУ, доцент кафедры электроэнергетики и физики.

Бенюх Олег Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры машин, тракторов и автомобилей КГУ им. А. Байтурсынова.

Автор:

Валентова Анна Юрьевна, старший преподаватель

В 15 Валентова А.Ю.

Физика Электричество Учебно-методическое пособие для инженерных специальностей – Костанай, 2019. - 96 с.

ISBN 978-601-7597-17-7

В учебно-методическое пособие включены основные определения, понятия и законы электричества и типовые многовариантные задачи, а также примеры их решения. Пособие включает в себя следующие разделы электричества: электростатику и постоянный электрический ток.

Предназначено для студентов технических и технологических специальностей.

УДК 530.1

ББК 22.3

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета им. А. Байтурсынова, ____20__ г , протокол № ____.

© Валентова А.Ю., 2019

Содержание

	Введение	4
1	Электростатика	9
1.1	Электрическое поле в вакууме	9
1.1.1	Основные теоретические понятия и формулы	9
1.1.2	Примеры решения многовариантных задач	14
1.1.3	Задачи для самостоятельного решения	22
1.2	Потенциальность электростатического поля	24
1.2.1	Основные теоретические понятия и формулы	24
1.2.2	Примеры решения многовариантных задач	26
1.2.3	Задачи для самостоятельного решения	38
1.3	Электрическое поле при наличии проводников и диэлектриков. Конденсаторы. Энергия электростатического поля.	39
1.3.1	Основные теоретические понятия и формулы	39
1.3.2	Примеры решения многовариантных задач	44
1.3.3	Задачи для самостоятельного решения	52
2.	Постоянный электрический ток.	54
2.1	Основные законы постоянного тока.....	54
2.1.1	Основные теоретические понятия и формулы	54
2.1.2	Примеры решения многовариантных задач	61
2.1.3	Задачи для самостоятельного решения	71
2.2	Ток в металлах, жидкостях и газах	76
2.2.1	Основные теоретические понятия и формулы	76
2.2.2	Примеры решения многовариантных задач	81
2.2.3	Задачи для самостоятельного решения	87
	Заключение.....	88
3.	Приложения	89
4.	Список использованных источников.....	96

Введение

Изучение общей физики лишено всякого смысла без решения задач. Для хорошего усвоения теории очень важно практиковаться в решении стандартных задач. Данное пособие содержит примеры решения задач и многовариантные задачи для самостоятельного решения. Многовариантные задачи позволяют каждую задачу представить как набор из нескольких разных задач.

В этом пособии рассмотрим один из частных случаев электромагнитного поля – электрическое поле. В том числе изучим два основных раздела электричества: электростатику и постоянный электрический ток (электродинамику)

При изложении ряда вопросов этого раздела мы встретимся с некоторыми новыми понятиями: *поток* и *циркуляцией* векторной функции, а также с *градиентом* скалярной функции. Рассмотрим их последовательно.

Определим *элементарный поток* $d\Phi$ любого вектора $\vec{b}$ через бесконечно малую площадку da как *скалярное произведение* этого вектора на элемент поверхности или, иначе, на *вектор площадки*

$$d\vec{a} = da \cdot \vec{n} \quad (1)$$

где $\vec{n}$ — внешняя нормаль к площадке da .

Очевидно, что элемент поверхности $d\vec{a}$ направлен перпендикулярно поверхности в каждой ее точке. Руководствуясь определением потока, и обозначив его через Φ , можно записать

$$d\Phi = \vec{b} \cdot d\vec{a} = b \cdot da \cdot \cos\alpha, \quad (2)$$

где α — угол между вектором $\vec{b}$ и нормалью, проведенной к элементу поверхности (Рисунок 1),

$d\Phi$ — элементарный поток вектора $\vec{b}$.

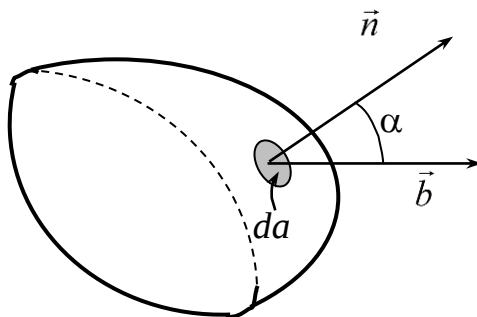


Рисунок 1

Название величины Φ — *поток* — взято из гидродинамики. Действительно, если $\vec{v}$ — скорость текущей жидкости, а a — площадь погруженной в нее плоской сетки, то объем жидкости, протекающей через сетку в единицу времени, будет равен

$$\Phi = v \cdot a \cdot \cos \alpha, \quad (3)$$

то есть Φ здесь — это поток вектора скорости.

На Рисунке 2 представлены три различные ориентации этой сетки. Очевидно, что последнее равенство (3) может быть получено интегрированием по всей поверхности a равенства (2), определяющего понятие элементарного потока, при условии, что величина вектора скорости и угол α постоянны по всей поверхности.

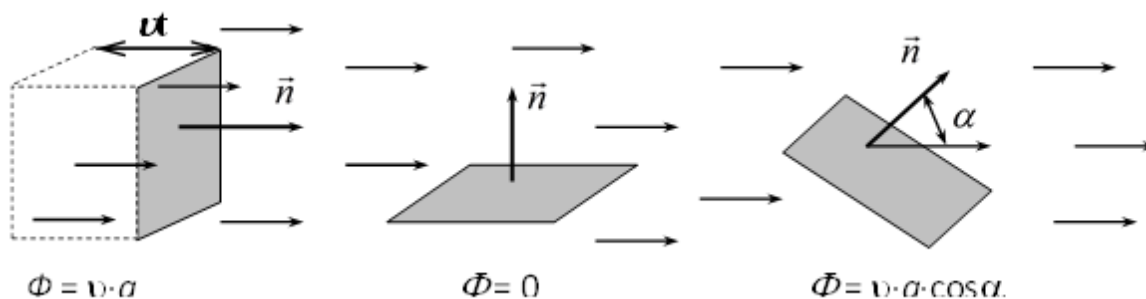


Рисунок 2

Естественно, что понятие потока применимо к любому множеству векторов, имеющих тот или иной физический смысл.

Понятие, к рассмотрению которого мы теперь переходим, несколько более сложно. Пусть имеется совокупность векторов $\vec{b}$, различной длины и направления, и задана некоторая кривая L , которую можно разбить на элементы $d\vec{l}$ (Рисунок 3).

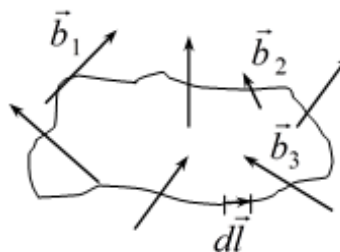


Рисунок 3

Требуется найти сумму скалярных произведений вектора $\vec{b}$ на соответствующий ему элемент перемещения $d\vec{l}$. Очевидно, что на каждом элементе $d\vec{l}$ вектор $\vec{b}$ имеет свое направление и величину. Если кривая L

замкнута, интегрирование ведется по замкнутому контуру, что обозначается кружком у знака интеграла, а интеграл от вектора $\vec{b}$ носит название *циркуляции $\vec{b}$ вдоль контура L* :

$$\oint \vec{b} d\vec{l} = \oint b dl \cos \alpha = \oint b_l d\vec{l} \quad (4)$$

где b_l есть проекция вектора на соответствующий элемент контура.

Положим теперь, что контур L есть плоский прямоугольник (Рисунок 4), имеющий стороны Δx и Δy .

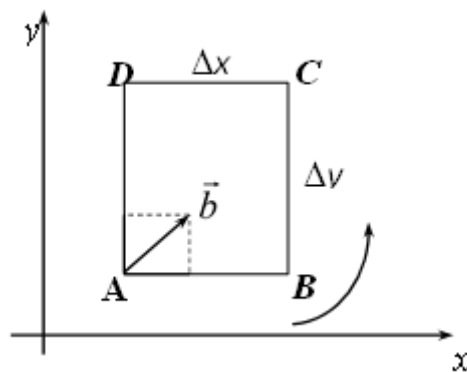


Рисунок 4

Выбрав обозначенное стрелкой направление обхода, начатого из точки A , получим возможность представить означенный выше интеграл суммой четырех произведений, взятых последовательно по каждой из сторон:

$$\oint b_l dl = b_{x_1} \Delta x + b_{y_1} \Delta y - b_{x_2} \Delta x - b_{y_2} \Delta y \quad (5)$$

где b_{x_1} , b_{x_2} , b_{y_1} , b_{y_2} — значения проекций вектора $\vec{b}$ на соответствующие стороны прямоугольника.

Отрицательный знак появляется потому, что обход по контуру дважды совпадает с убывью координаты. Условимся выбирать прямоугольник столь малым, чтобы на его сторонах Δx и Δy соответствующие проекции вектора $\vec{b}$ можно было бы считать постоянными. Последнее означает, что при обходе, например, по стороне Δy проекция b_y сохраняет свое значение, но проекция b_x будет меняться. При обходе по Δx , естественно, меняться будет проекция b_y .

Изменение проекции b_y на единицу пути по оси x составит $\frac{\partial b_y}{\partial x}$, а изменение b_x

на единицу пути по оси y — $\frac{\partial b_x}{\partial y}$. Значения b_y , например, на отрезках AD и BC

будут отличаться друг от друга на величину $\frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta x$. Следовательно

$$b_{y_1} = b_{y_2} + \frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta x; \quad b_{x_2} = b_{x_1} + \frac{\partial b_x}{\partial y} \Delta y. \quad (6)$$

Тогда

$$\oint b_l dl = b_{x_1} \Delta x + (b_{y_2} + \frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta x) \Delta y - (b_{x_1} + \frac{\partial b_x}{\partial y} \Delta y) \Delta x - b_{y_2} \Delta y. \quad (7)$$

Раскрывая скобки и заменяя произведение $\Delta x \Delta y$ через ΔS , получим:

$$\oint b_l dl = \frac{\partial b_y}{\partial x} \Delta S - \frac{\partial b_x}{\partial y} \Delta S. \quad (8)$$

Полученное выражение есть *циркуляция* вектора $\vec{b}$ в двумерном случае.

Коснемся теперь еще одного понятия — *градиента*. Пусть имеется скалярное поле φ , то есть заданные в каждой точке значения некоторой скалярной величины φ . Выделим в нем совокупность точек, где значения функции φ одинаковы (Рисунок 5) и равны какому-либо значению φ_0 .

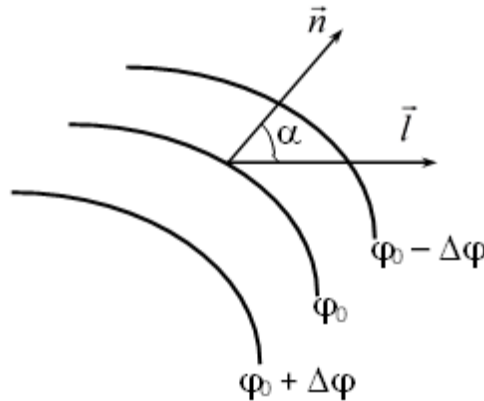


Рисунок 5

Эта совокупность образует поверхность, называемую *поверхностью уровня*. Рядом расположены поверхности с большими и меньшими значениями этой же скалярной величины. Выберем произвольное направление $\vec{l}$.

Производная $\frac{d\varphi}{dl}$ будет характеризовать изменение функции φ на единицу длины в направлении $\vec{l}$. Теперь проведем к поверхности φ_0 нормаль $\vec{n}$.

Производная $\frac{d\varphi}{dn}$ будет также характеризовать изменение этой же функции φ на единицу длины, но уже в направлении $\vec{n}$. Естественно, значения производных не будут одинаковы: производная по n больше производной по l .

Вектор, численно равный $\frac{d\varphi}{dn}$ и направленный по нормали к поверхности уровня, называют *градиентом* скалярной функции φ :

$$\mathbf{grad} \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \vec{n}. \quad (9)$$

Очевидно, что производная от φ по направлению l равна проекции вектора градиента на это направление, так как $\partial n = \partial l \cos \alpha$ (см. Рисунок 5). Отсюда можно заключить, что в направлении вектора градиента значение функции φ меняется наиболее быстро: при положительном значении градиента — возрастает, при отрицательном — уменьшается.

В декартовых координатах градиент можно представить как векторную сумму его проекций на оси координат:

$$\mathbf{grad} \varphi = \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (10)$$

1. Электростатика

1.1 Электростатическое поле в вакууме.

1.1.1 Основные теоретические понятия и формулы

Электростатика – раздел учения об электричестве, изучающий взаимодействие неподвижных электрических зарядов и свойства постоянного электрического поля.

Электрический заряд – это внутреннее свойство тел или частиц, характеризующее их способность к электромагнитным взаимодействиям.

Единица электрического заряда – кулон (Кл)

Минимальный электрический заряд: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Свойства электрического заряда:

- существует в двух видах, **положительный** и **отрицательный**
- электрический заряд **инвариантен** – его величина не зависит от системы отсчёта
- электрический заряд **дискретен** – заряд любого тела составляет целое кратное от элементарного электрического заряда.
- электрический заряд **аддитивен** – заряд любой системы тел равен сумме зарядов тел, входящих в систему.
- электрический заряд подчиняется **закону сохранения заряда**.

Закон сохранения заряда:

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остаётся неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри данной системы.

Точечный электрический заряд – заряженное тело, форма и размеры которого несущественны в данной задаче.

Основной эмпирический закон электростатики – **закон Кулона**

Закон Кулона:

Сила взаимодействия F между двумя неподвижными точечными зарядами, находящимися в вакууме, пропорциональна зарядам q_1 и q_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (11)$$

где F - сила взаимодействия двух точечных зарядов q_1 и q_2 в вакууме
 r - расстояние между зарядами,

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ - электрическая постоянная

Закон Кулона в изотропной среде:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} \quad (12)$$

где ϵ - диэлектрическая проницаемость среды – безразмерная величина, показывающая, во сколько раз сила взаимодействия F между зарядами в данной среде меньше их силы взаимодействия F_0 в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F} \quad (13)$$

Диэлектрическая проницаемость вакуума $\epsilon_{vac} = 1$

Объёмная плотность электрических зарядов:

$$\rho = \frac{dq}{dV} \quad (14)$$

где dq – заряд малого элемента заряженного тела объёмом dV

Поверхностная плотность электрических зарядов:

$$\sigma = \frac{dq}{dS} \quad (15)$$

где dq – заряд малого участка заряженной поверхности площадью dS

Линейная плотность электрических зарядов:

$$\tau = \frac{dq}{dl} \quad (16)$$

где dq – заряд малого участка заряженной линии длиной dl .

Напряжённость электростатического поля – векторная физическая величина, определяемая силой, действующей на единичный положительный заряд q_0 , помещённый в данную точку поля – **силовая характеристика электростатического поля**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (17)$$

Единица измерения напряжённости (Н/Кл) ньютон на кулон или (В/м) – вольт на метр.

Напряжённость электростатического поля точечного заряда в вакууме:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (18)$$

Напряжённость электростатического поля точечного заряда в диэлектрике:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r} \quad (19)$$

Напряжённость электростатического поля точечного заряда в вакууме (в скалярной форме):

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (20)$$

Напряжённость электростатического поля точечного заряда в диэлектрике(в скалярной форме):

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q}{r^2} \quad (21)$$

Поток вектора напряжённости через площадку dS :

$$d\Phi_E = \vec{E} d\vec{S} = E_n dS \quad (22)$$

Поток вектора $\vec{E}$ напряжённости через произвольную поверхность S :

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} d\vec{S} = \int_S E_n dS \quad (23)$$

Принцип суперпозиции электростатических полей

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i; \varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i \quad (24)$$

Теорема Гаусса - Остроградского для электростатического поля в вакууме:

поток вектора напряжённости электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключённых внутри этой поверхности зарядов, делённых на ϵ_0 .

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV \quad (25)$$

Частные случаи электростатических полей, создаваемых системами зарядов:

1) Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью:

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (26)$$

2) Напряжённость поля, создаваемого двумя бесконечно параллельными разноимённо заряженными плоскостями:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (27)$$

- 3) **Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R с общим зарядом Q на расстоянии r от центра сферы:**

$$E = 0, (r < R - \text{внутри сферы}) \quad (28)$$

и

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}; (r \geq R - \text{вне сферы}) \quad (29)$$

- 4) **Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженным шаром радиусом R с общим зарядом Q на расстоянии r от центра шар:**

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Qr}{R^3}, \text{ при } r \leq R \text{ (внутри шара)}, \quad (30)$$

и

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}, \text{ при } r \geq R \text{ (вне шара)} \quad (31)$$

- 5) **Напряжённость поля, создаваемого равномерно заряженным бесконечным цилиндром радиусом R с общим зарядом Q на расстоянии r от оси цилиндра:**

$$E = 0, \text{ при } r < R \text{ (внутри цилиндра)} \quad (32)$$

и

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\tau}{r}, \text{ при } r \geq R \text{ (вне цилиндра)} \quad (33)$$

1.1.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 1

Расстояние между двумя точечными зарядами q_1 и q_2 равно d . Напряжённость электростатического поля, создаваемого в точке наблюдения зарядом q_1 равна E_1 .

Напряжённость электростатического поля, создаваемого в точке наблюдения зарядом q_2 равна E_2 .

Напряжённость результирующего электростатического поля в точке наблюдения равно E .

Точка наблюдения расположена точно посередине между зарядами. Диэлектрическая проницаемость среды равна ε .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 1):

Таблица 1

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d , см	120	*	40	*	280	400	120	240	300	80
q_1 , нКл	+8	+ 14	*	- 50	+40	+50	+35	- 30	*	- 12
E_1 , В/м	*	200	3600	360	*	*	*	*	40	*
q_2 , нКл	- 12	- 28	*	+ 80	- 60	+25	*	+120	+280	+ 36
E_2 , В/м	*	*	5400	*	*	11,25	*	*	*	*
E , В/м	*	*	*	*	*	*	375	*	*	*
ε	2,2	7	1	5	7	*	7	5	7	2,2

Примечание. Если необходимо найти величину заряда, то по умолчанию принимаем, что этот заряд положительный.

Пример решения 1 варианта

Дано:

$$d = 120 \text{ см} = 1,2 \text{ м}$$

$$q_1 = +8 \text{ нКл} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -12 \text{ нКл} = -12 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$\varepsilon = 2,2$$

Найти:

$$E_1 - ?$$

$$E_2 - ?$$

$$E - ?$$

Решение:

Сначала найдём напряжённость электростатического поля, создаваемого в точке наблюдения первым электрическим зарядом.

Модуль напряжённости электростатического поля точечного электрического заряда в диэлектрике находится по формуле:

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

Обратим внимание на то, что для данной задачи расстояние от точечного электрического заряда до точки наблюдения находится по формуле:

$$r = \frac{d}{2} = \frac{1,2}{2} = 0,6(\text{м})$$

Тогда:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_1}{r^2} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2} \cdot \frac{8 \cdot 10^{-9}}{(0,6)^2} = 90,9(\text{В/м})$$

При расчётах принимаем во внимание то, что:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$$

Аналогично вычисляем модуль напряжённости электростатического поля, создаваемого вторым электрическим зарядом:

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_2}{r^2} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2} \cdot \frac{12 \cdot 10^{-9}}{(0,6)^2} = 136,4(\text{В/м})$$

Для того, чтобы найти напряжённость электростатического поля, создаваемого электрическими зарядами q_1 и q_2 в точке наблюдения нужно применить принцип суперпозиции электростатических полей, согласно которому напряжённость результирующего поля, создаваемого системой зарядов равна *геометрической* сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности.

Поэтому построим чертёж (Рисунок 6)

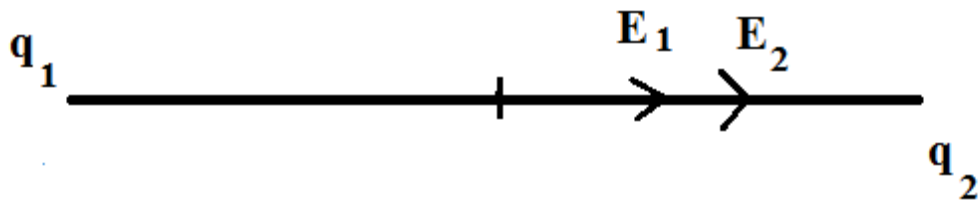


Рисунок 6

Заряд q_1 положительный, поэтому вектор напряжённости электростатического поля, создаваемого этим зарядом $\vec{E}_1$ будет направлен в сторону отталкивания от заряда q_1 . Заряд q_2 отрицательный, поэтому вектор напряжённости электростатического поля $\vec{E}_2$, создаваемый этим зарядом будет направлен в сторону притяжения к заряду q_2 . Таким образом (см. Рисунок 6) можно утверждать, что модуль результирующей напряжённости электростатического поля в точке наблюдения будет равен алгебраической сумме напряжённостей E_1 и E_2 :

$$E = E_1 + E_2 = 90,9 + 136,4 = 227,3(\text{В/м})$$

Ответ:

$$E_1 = 90,9 \text{ В/м}$$

$$E_2 = 136,4 \text{ В/м}$$

$$E = 227,3 \text{ В/м}$$

Пример решения 2 варианта:

Дано:

$$q_1 = -14 \text{ нКл} = -14 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$E_1 = 200 \text{ В/м}$$

$$q_2 = 28 \text{ нКл}$$

$$\varepsilon = 7$$

Найти:

$$d - ?$$

$$E_2 - ?$$

$$E - ?$$

Решение.

Поскольку известна напряжённость, создаваемая первым зарядом, можно найти r – расстояние от заряда до точки наблюдения. Для этого запишем формулу, по которой вычисляется напряжённость поля точечного заряда:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_1}{r^2}$$

Выразим из этой формулы r – расстояние от заряда до точки наблюдения:

$$r = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_1}{E_1}}$$

Подставим численные значения и получим:

$$r = \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_1}{E_1}} = \sqrt{\frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 7} \cdot \frac{14 \cdot 10^{-9}}{200}} = 0,3(\text{м})$$

Так как точка наблюдения находится на середине линии, которая соединяет два заряда, расстояние между зарядами можно найти так:

$$d = 2r = 2 \cdot 0,3 = 0,6(\text{м})$$

Определим напряжённость электростатического поля созданного вторым зарядом в точке наблюдения:

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_2}{r^2}$$

Подставим численные значения и получим:

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_2}{r^2} = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 7} \cdot \frac{28 \cdot 10^{-9}}{0,3^2} = 400(\text{В/м})$$

Для того, чтобы найти напряжённость электростатического поля, создаваемого электрическими зарядами q_1 и q_2 в точке наблюдения нужно применить принцип суперпозиции электростатических полей, согласно которому напряжённость результирующего поля, создаваемого системой зарядов равна *геометрической* сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности. Воспользуемся рисунком 6 (см. выше) и

получим, что поскольку заряд q_1 положительный, поэтому вектор напряжённости электростатического поля, создаваемого этим зарядом $\vec{E}_1$ будет направлен в сторону отталкивания от заряда q_1 . Заряд q_2 отрицательный, поэтому вектор напряжённости электростатического поля $\vec{E}_2$, создаваемый этим зарядом будет направлен в сторону притяжения к заряду q_2 . Таким образом (см. Рисунок 6) можно утверждать, что модуль результирующей напряжённости электростатического поля в точке наблюдения будет равен алгебраической сумме напряжённостей E_1 и E_2 :

$$E = E_1 + E_2 = 200 + 400 = 600(\text{В/м})$$

Ответ:

$$d = 0,6(\text{м})$$

$$E_2 = 400(\text{В/м})$$

$$E = 600(\text{В/м})$$

Остальные варианты аналогичны вариантам представленным выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 2

Поток вектора напряжённости через сферическую поверхность радиуса R , охватывающую точечные заряды Q_1 и Q_2 , равен Φ_E , поток вектора напряжённости сквозь площадку S , расположенную на поверхности этой сферы равен Φ_1

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 2):

Таблица 2

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_1 , нКл	100	25	40	50	90	*	140	20	150	200
Q_2 , нКл	- 90	*	-5	- 20	- 50	- 110	- 130	*	*	- 190
R , см	20	50	70	*	30	80	40	60	70	100
S , см ²	5	*	*	60	120	*	12	*	*	40
Φ_E , кВ · м	*	1,13	*	*	*	4,52	*	13,56	12,43	*
Φ_1 , кВ · м	*	0,2	2	1,7	*	0,3	*	2	3	*

Пример решения 1 варианта

Дано:

$$Q_1 = 100 \text{ нКл} = 100 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$Q_2 = -90 \text{ нКл} = 100 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$R = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$$

$$S = 20 \text{ см}^2 = 20 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Найти:

$$\Phi_E - ?$$

$$\Phi_1 - ?$$

Решение.

Поток вектора напряжённости электростатического поля сквозь замкнутую поверхность находим в соответствии с теоремой Гаусса – Остроградского. Согласно этой теореме *поток вектора напряжённости электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключённых внутри этой поверхности зарядов, делённых на ϵ_0 .*

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

Тогда, применив эту формулу, получим:

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} (Q_1 + Q_2) = \frac{1}{8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot (100 \cdot 10^{-9} - 90 \cdot 10^{-9}) = 1,13 \cdot 10^3 \text{ (В/м)}$$

Этот полный поток вектора напряжённости электростатического поля сквозь замкнутую поверхность. Для того чтобы высчитать поток вектора напряжённости сквозь часть поверхности, расположенной на сфере радиусом R необходимо составить пропорцию, исходя из тех соображений, что полный поток вектора напряжённости сквозь замкнутую поверхность пронизывает всю площадь поверхности сферы радиусом R сферу, а некоторый участок площадью S пронизывается только частью этого потока, причём отношение полного потока к этой части будет равно отношению площади поверхности сферы к площади участка, через который идёт поток Φ_1 :

$$\frac{4\pi R^2}{S} = \frac{\Phi_E}{\Phi_1}$$

Тогда, поток вектора напряжённости электростатического поля сквозь некоторый участок площадью S , можно найти по следующей формуле:

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_E \cdot S}{4\pi R^2} = \frac{1,13 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,2^2} = 1,12(\text{В} \cdot \text{м})$$

Ответ:

$$\Phi_E = 1,13 \cdot 10^3(\text{В/м})$$

$$\Phi_1 = 1,12(\text{В} \cdot \text{м})$$

Пример решения 2 варианта.

Дано:

$$Q_1 = 25 \text{ нКл} = 25 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$R = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$$

$$\Phi_E = 1,13 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}$$

$$\Phi_1 = 0,2 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{м}$$

Найти:

$$Q_2 - ?$$

$$S - ?$$

Решение.

Поток вектора напряжённости электростатического поля сквозь замкнутую поверхность находим в соответствии с теоремой Гаусса – Остроградского.

Согласно этой теореме *поток вектора напряжённости электростатического поля в вакууме сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключённых внутри этой поверхности зарядов, делённых на ϵ_0 .*

$$\Phi_E = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV$$

Тогда, применив эту формулу, получим:

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon_0}(Q_1 + Q_2)$$

Откуда можно найти Q_2 :

$$Q_2 = \Phi_E \cdot \varepsilon_0 - Q_1$$

Подставим численные значения и получим:

$$Q_2 = \Phi_E \cdot \varepsilon_0 - Q_1 = 1,13 \cdot 10^3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} - 25 \cdot 10^{-9} = -15 \cdot 10^{-9}(\text{Кл})$$

Или:

$$Q_2 = -15\text{нКл.}$$

Полный поток вектора напряжённости электростатического поля сквозь замкнутую поверхность равен Φ_E . Для того чтобы высчитать поток вектора напряжённости сквозь часть поверхности, расположенной на сфере радиусом R необходимо составить пропорцию, исходя из тех соображений, что полный поток вектора напряжённости сквозь замкнутую поверхность пронизывает всю площадь поверхности сферы радиусом R сферу, а некоторый участок площадью S пронизывается только частью этого потока, причём отношение полного потока к этой части будет равно отношению площади поверхности сферы к площади участка, через который идёт поток Φ_1 :

$$\frac{4\pi R^2}{S} = \frac{\Phi_E}{\Phi_1}$$

Отсюда, зная Φ_E и Φ_1 можем найти S :

$$S = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2 \cdot 0,2 \cdot 10^3}{1,13 \cdot 10^3} = 0,56(\text{м}^2)$$

Ответ:

$$Q_2 = -15\text{нКл.}$$

$$S = 0,56(\text{м}^2)$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

1.1.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 3.

Точечный заряд Q находится в электростатическом поле напряжённостью E , созданном прямым бесконечным цилиндром радиусом R , равномерно заряженным с поверхностной плотностью σ .

Сила, действующая на заряд, помещённый от оси цилиндра на расстоянии r равна F .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 3):

Таблица 3

Нвар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q , нКл	25	10	*	20	5	4	50	*	8	15
R , см.	1	0,5	2	0,2	*	0,4	0,5	0,8	*	1,5
E , кВ/м	*	*	75	*	6,78	*	*	45,2	45,2	*
r , см	10	20	15	20	30	*	20	*	80	70
σ , мКл/м ²	2	4	*	8	6	3	5	8	4	1
F , мкН	*	*	150	*	*	36,2	*	90,4	*	*

Задача 4

Равномерно заряженный шар радиусом R с общим зарядом Q .

Объём шара равен V .

Объёмная плотность электрического заряда шара равна ρ .

Напряжённость электростатического поля, создаваемого внутри шара на расстоянии r_1 от центра шара равна E_1 .

Напряжённость электростатического поля, создаваемого вне шара на расстоянии r_2 от центра шара равна E_2 .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 4):

Таблица 4.

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R, \text{см}$	5	*	10	7	*	6	*	8	10	20
$Q, \text{нКл}$	*	6	12	*	*	*	4	*	8	16
$V, \text{см}^3$	*	904,32	*	*	4187	*	*	*	*	*
$\rho, \text{нКл/м}^3$	10	*	*	7	20	3	0,5	2	*	*
$r_1, \text{см}$	3	2	5	*	3	1	0,2	3	4	17
$E_1, \text{В/м}$	*	*	*	13,2	*	*	*	*	*	*
$r_2, \text{см}$	10	12	20	*	15	8	6	16	14	25
$E_2, \text{В/м}$	*	*	*	9,05	*	*	*	*	*	*

Задача 5

Напряжённость электростатического поля, создаваемого точечным зарядом Q на расстоянии r_1 от него равна E_1 .

Напряжённость электростатического поля, создаваемого точечным зарядом Q на расстоянии r_2 от него равна E_2 .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 5):

Таблица 5

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q, \text{нКл}$	5	*	15	*	*	30	45	20	4	*
$r_1, \text{см}$	50	30	5	40	10	*	300	90	*	250
$E_1, \text{В/м}$	*	1200	*	*	*	120	*	*	36	100,8
$r_2, \text{см}$	80	80	90	20	30	40	120	*	25	*
$E_2, \text{В/м}$	*	*	*	1800	1000	*	*	180	*	2520

1.2 Потенциальность электростатического поля

1.2.1 Основные теоретические понятия и формулы

Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении заряда q из точки 1 в точку 2. (см. Рисунок 7):

$$A_{12} = Q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (34)$$

или

$$A_{12} = Q_0 \cdot \int_1^2 \vec{E} d\vec{l} = Q_0 \int_1^2 E_l dl \quad (35)$$

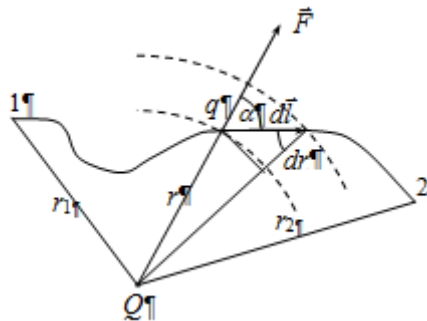


Рисунок 7.

Циркуляция вектора напряжённости электростатического поля:

$$\int_L \vec{E} d\vec{l} = \int_L E_l dl \quad (36)$$

Потенциальная энергия заряда q_0 , находящегося в поле заряда q на расстоянии r от него равна

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq_0}{r} + const \quad (37)$$

Для одноимённых зарядов потенциальная энергия их взаимодействия (**отталкивания**) **положительна**, для разноимённых зарядов потенциальная энергия их взаимодействия (**притяжения**) **отрицательна**.

Если поле, создаётся системой n точечных зарядов, то потенциальная энергия заряда q_0 , находящегося в этом поле, равна сумме его потенциальных энергий, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:

$$U = \sum_{i=1}^n U_i = q_0 \sum_{i=1}^n \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_i} \quad (38)$$

Потенциал φ в какой либо точке электростатического поля есть скалярная физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещённого в эту точку:

$$\varphi = \frac{U}{q_0} \quad (39)$$

Единица измерения потенциала – (В) вольт.

Напряжённость и потенциал электростатического поля точечного заряда на расстоянии r от заряда в вакууме:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}; \varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r} \quad (40)$$

Разность потенциалов двух точек 1 и 2 в электростатическом поле определяется работой, совершаемой силами поля, при перемещении единичного положительного заряда из точки 1 в точку 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi = \frac{A_{12}}{q_0} \quad (41)$$

Принцип суперпозиции потенциалов электростатических полей:

Если поле создаётся несколькими зарядами, то потенциал поля системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей всех этих зарядов.

Связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right) = -\nabla\varphi \quad (42)$$

В случае поля, обладающего **центральной или осевой симметрией**

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \quad (43)$$

1.2.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 6.

Пылинка массой m и зарядом Q первоначально находившаяся в покое, попала в зазор с однородным электростатическим полем напряжённостью E , длиной l и прошла в вакууме ускоряющую разность потенциалов U . Со стороны электростатического поля на пылинку действовала сила F , в результате этого манёвра, пылинка двигалась в зазоре с ускорением a в течении времени t и приобрела на вылете из зазора скорость v и импульс p . Кинетическая энергия пылинки равна W .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 6):

Таблица 6

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m , мг.	1	*	3	*	5	*	3	*	8	12
U , МВ	600	200	*	200	*	*	120	*	20	60
Q , нКл	2	0,2	5	8	*	50	*	16	8	60
E , МВ/м	*	*	200	*	500	*	60	*	*	*
l , мм	500	*	5	5	2	4	*	*	4	*
F , Н	*	*	*	*	1	*	*	*	*	*
a , м/с ² ,	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
t , мкс	*	20	*	*	*	*	3	2	*	3
v , км/с	*	2	*	16	*	2	*	5	*	*
p , нН · с	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W , Дж	*	*	*	*	*	4	*	50	*	*

Пример решения 1 варианта

Дано:

$$m = 1\text{мг} = 1 \cdot 10^{-6}\text{кг}$$

$$Q = 2\text{нКл} = 2 \cdot 10^{-9}$$

$$U = 600\text{МВ} = 6 \cdot 10^8\text{В}$$

$$l = 0,5\text{м}$$

Найти:

E —?

F —?

a —?

t —?

v —?

p —?

W —?

Решение.

Потенциальная энергия пылинки в электростатическом поле зазора преобразуется в её кинетическую энергию:

$$Q \cdot U = \frac{mv^2}{2} = W$$

Рассчитаем кинетическую энергию пылинки:

$$W = Q \cdot U = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 6 \cdot 10^8 = 1,2 \text{ (Дж)}$$

Отсюда можем найти скорость движения пылинки:

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}}$$

Рассчитаем скорость движения пылинки:

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,2}{1 \cdot 10^{-6}}} = 1,55 \cdot 10^3 \text{ (м/с)}$$

Найдём напряжённость электростатического поля из следующей формулы:

$$U = E \cdot l$$

Откуда:

$$E = \frac{U}{l}$$

Рассчитаем напряжённость электростатического поля:

$$E = \frac{6 \cdot 10^6}{0,5} = 12 \cdot 10^6 (\text{В/м})$$

Теперь можно определить модуль силы, которая действует на пылинку со стороны электростатического поля:

$$F = E \cdot Q$$

Рассчитаем силу, действующую на пылинку со стороны электростатического поля:

$$F = E \cdot Q = 12 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 24 \cdot 10^{-3} = 24 (\text{мН})$$

Исходя из второго закона Ньютона определим ускорение, с которым пылинка движется в электростатическом поле:

$$a = \frac{F}{m}$$

Рассчитаем ускорение:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{24 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 24 \cdot 10^3 (\text{м/с}^2)$$

Зная ускорение, можно рассчитать время движения частицы в электростатическом поле:

$$t = \frac{v}{a}$$

Вычислим время движения пылинки:

$$t = \frac{1,55 \cdot 10^3}{24 \cdot 10^3} = 64,6 \cdot 10^{-3} = 64,6 (\text{мс})$$

Определим импульс пылинки на вылете с электростатического поля:

$$p = mv$$

Рассчитаем импульс пылинки на вылете с электростатического поля:

$$p = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,55 \cdot 10^3 = 1,55 \cdot 10^{-3} (\text{Н} \cdot \text{с})$$

Ответ:

$$E = 12 \cdot 10^6 (\text{В/м})$$

$$F = 24 (\text{мН})$$

$$a = 24 \cdot 10^3 (\text{м/с}^2)$$

$$t = 64,6 (\text{мс})$$

$$v = 1,55 \cdot 10^3 (\text{м/с})$$

$$p = 1,55 \cdot 10^{-3} (\text{Н} \cdot \text{с})$$

$$W = 1,2 (\text{Дж})$$

Пример решения второго варианта.

Дано:

$$U = 200 \text{ МВ} = 200 \cdot 10^6 \text{ В} = 2 \cdot 10^8 \text{ В.}$$

$$Q = 0,2 \text{ нКл} = 0,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$t = 20 \text{ мкс} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$$

$$v = 2 \cdot 10^3 \text{ м/с}$$

Найти:

$$m - ?$$

$$E - ?$$

$$l - ?$$

$$F - ?$$

$$a - ?$$

$$p - ?$$

$$W - ?$$

Решение.

Для того, чтобы найти массу пылинки, определим, какую кинетическую энергию она приобретёт в результате прохождения через ускоряющее поле:

$$Q \cdot U = \frac{mv^2}{2} = W$$

Подставим численные значения и получим:

$$W = Q \cdot U = 0,2 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^8 = 40 \cdot 10^{-3}(\text{Дж})$$

Зная кинетическую энергию пылинки найдём её массу из следующей формулы:

$$W = \frac{mv^2}{2}$$

Формула для массы пылинки:

$$m = \frac{2W}{v^2}$$

Подставим численные значения и получим:

$$m = \frac{2W}{v^2} = \frac{2 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{(2 \cdot 10^3)^2} = 20 \cdot 10^{-9}(\text{кг})$$

Теперь найдём ускорение с которым пылинка двигалась в ускоряющем поле:

$$a = \frac{v}{t}$$

Подставим численные значения и получим:

$$a = \frac{v}{t} = \frac{2 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^{-6}} = 0,1 \cdot 10^9(\text{м/с}^2)$$

Найдём длину зазора, в котором действует ускоряющее поле. Если принять начальную скорость заряженной пылинки равной нулю до попадания в ускоряющую разность потенциалов, то можно воспользоваться формулой для расчёта пути при прямолинейном равноускоренном движении с нулевой начальной скоростью:

$$l = \frac{at^2}{2}$$

Подставим численные значения и получим:

$$l = \frac{at^2}{2} = \frac{0,1 \cdot 10^9(20 \cdot 10^{-6})^2}{2} = 20 \cdot 10^{-3}(\text{м})$$

Найдём напряжённость электрического поля, для этого воспользуемся формулой:

$$U = E \cdot l$$

Откуда получим:

$$E = \frac{U}{l}$$

Подставим численные значения и получим:

$$E = \frac{2 \cdot 10^8}{20 \cdot 10^{-3}} = 100 \cdot 10^9 (\text{В/м})$$

Сила, с которой электростатическое поле действует на заряженную пылинку, определим по формуле:

$$F = Q \cdot E$$

Подставим численные значения и получим:

$$F = 0,2 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10^9 = 4 (\text{Н})$$

Найдём импульс, который приобретёт пылинка после прохождения через ускоряющую разность потенциалов:

$$p = m \cdot v$$

Подставим численные значения и получим:

$$p = m \cdot v = 20 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 10^3 = 40 \cdot 10^{-6} (\text{Н} \cdot \text{с})$$

Ответ:

$$m = 20 \cdot 10^{-9} (\text{кг})$$

$$E = 100 \cdot 10^9 (\text{В/м})$$

$$l = 20 \cdot 10^{-3} (\text{м})$$

$$F = 4 (\text{Н})$$

$$a = 0,1 \cdot 10^9 (\text{м/с}^2)$$

$$p = 40 \cdot 10^{-6} (\text{Н} \cdot \text{с})$$

$$W = 40 \cdot 10^{-3} (\text{Дж})$$

Остальные варианты аналогичны вариантам представленным выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 6

Положительные заряды Q_1 и Q_2 находятся в вакууме на расстоянии r_1 друг от друга. Работа, которую необходимо совершить, для того, чтобы сблизить заряды до расстояния r_2 равна A . Потенциалы электростатического поля, создаваемого зарядом Q_1 в точках начала и конца пути, равны соответственно φ_1 и φ_2 .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 6):

Таблица 6.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Q_1 , мкКл	3	*	12	*	12	18	24	32	60
Q_2 , нКл	2	5	20	*	12	450	120	800	640
A' , мкДж	*	*	*	54	*	*	*	*	*
r_1 , м	1,5	2	*	5	5	0,8	0,1	7	9
r_2 , м	1	3	*	2	1	0,2	0,05	4	5
φ_1 , кВ	*	*	270	*	*	*	*	*	*
φ_2 , кВ	*	15	90	45	*	*	*	*	*

Пример решения 1 варианта.

Дано:

$$Q_1 = 3 \text{ мкКл} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

$$Q_2 = 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$r_1 = 1,5 \text{ м}$$

$$r_2 = 1 \text{ м}$$

Найти:

$$A' - ?$$

$$\varphi_1 - ?$$

$$\varphi_2 - ?$$

Решение.

Положим, что первый заряд Q_1 остаётся неподвижным, а второй заряд Q_2 под действием внешних сил перемещается в поле, созданном зарядом Q_1 приближаясь к нему с расстояния r_1 до расстояния r_2 .

Работа внешней силы A' по перемещению заряда Q из одной точки поля с потенциалом φ_1 в другую, потенциал которой равен φ_2 , равна по модулю и противоположна по знаку работе A сил поля по перемещению заряда между теми же точками:

$$A' = -A$$

Работа A сил поля по перемещению заряда равна:

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Тогда работа A' может быть записана в виде:

$$A' = -Q(\varphi_1 - \varphi_2) = Q(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (44)$$

Потенциал точки начала пути находим по формуле:

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}$$

Рассчитаем потенциал точки начала пути, принимая во внимание то, что:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$$

Получим:

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{1,5} = 18 \cdot 10^3 = 18(\text{кВ})$$

Аналогично найдём потенциал конца пути:

$$\varphi_2 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_2}$$

Вычислим его:

$$\varphi_2 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{1} = 27 \cdot 10^3 = 27(\text{кВ})$$

Подставляя выражения φ_1 и φ_2 в формулу (44) и учитывая то, для данного случая переносимый заряд:

$$Q = Q_2$$

Получим формулу:

$$A' = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (45)$$

Подставим значения величин в формулу (45) и после вычисления найдём:

$$A' = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1,5} \right) = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

То есть

$$A' = 18(\text{мкДж})$$

Ответ:

$$A' = 180(\text{мкДж})$$

$$\varphi_1 = 18(\text{кВ})$$

$$\varphi_2 = 27(\text{кВ})$$

Пример решения 2 варианта:

Дано:

$$Q_2 = 5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл. и}$$

$$r_1 = 2 \text{ м}$$

$$r_2 = 3 \text{ м}$$

$$\varphi_2 = 15 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Найти:

$$Q_1 - ?$$

$$A' - ?$$

$$\varphi_1 - ?$$

Решение:

Положим, что первый заряд Q_1 остаётся неподвижным, а второй заряд Q_2 под действием внешних сил перемещается в поле, созданном зарядом Q_1 приближаясь к нему с расстояния r_1 до расстояния r_2 .

Работа внешней силы A' по перемещению заряда Q из одной точки поля с потенциалом φ_1 в другую, потенциал которой равен φ_2 , равна по модулю и

противоположна по знаку работе A сил поля по перемещению заряда между теми же точками:

$$A' = -A$$

Работа A сил поля по перемещению заряда равна:

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Тогда работа A' может быть записана в виде:

$$A' = -Q(\varphi_1 - \varphi_2) = Q(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (44)$$

Потенциал точки начала пути находим по формуле:

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1}$$

Для определения потенциала точки начала пути необходимо найти величину заряда Q_1 . Нам известны потенциал точки конца пути и расстояние до неё от заряда Q_1 . Тогда, используя формулу для определения потенциала точечного электрического заряда можно найти Q_2 :

$$\varphi_2 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_2}$$

Откуда получаем:

$$Q_1 = \varphi_2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r_2$$

Подставим численные значения и получим:

$$Q_1 = \varphi_2 \cdot 4\pi\epsilon_0 r_2 = 15 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3 = 5 \cdot 10^{-6} (\text{Кл})$$

Теперь можно найти потенциал начала пути, подставим численные значения и получим:

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2} = 22,5 \cdot 10^3 (\text{В})$$

Подставляя выражения φ_1 и φ_2 в формулу (44) и учитывая то, для данного случая переносимый заряд:

$$Q = Q_2$$

Получим формулу:

$$A' = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (45)$$

Подставим значения величин в формулу (45) и после вычисления найдём:

$$A' = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) = \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \right) = 45 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$$

То есть

$$A' = 45(\text{мкДж})$$

Ответ:

$$Q_1 = 5 \cdot 10^{-6}(\text{Кл})$$

$$\varphi_1 = 22,5 \cdot 10^3(\text{В})$$

$$A' = 45(\text{мкДж})$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

1.2.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 7.

Точечные заряды Q_1 и Q_2 расположены на расстоянии d друг от друга. Первый заряд создаёт в точке наблюдения, лежащей посередине между зарядами, электростатическое поле с потенциалом φ_1 и напряжённостью E_1 .

Второй заряд создаёт в точке наблюдения, лежащей посередине между зарядами, электростатическое поле с потенциалом φ_2 и напряжённостью E_2 .

Напряжённость и потенциал электростатического поля в точке, находящейся посередине между зарядами равны соответственно E и φ .

Диэлектрическая проницаемость сред равна ε .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 7):

Таблица 7.

№вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_1 , нКл	+8	+10	+20	+16	+50	+40	+30	+2	+100	+5
φ_1 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_1 , В/м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ε	2,2	2,0	7,0	5,0	3,0	2,2	2,0	7,0	5,0	3,0
Q_2 , нКл	-30	-3	-55	-12	-60	-30	-50	-10	-20	-100
φ_2 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_2 , В/м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
d , см	20	40	60	80	4	28	16	90	100	30
φ , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E , В/м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Задача 8

Пылинка массой m несущая на себе N электронов прошла в вакууме ускоряющую разность потенциалов U .

Кинетическая энергия пылинки равна W .

Скорость, которую приобрела пылинка в результате прохождения через ускоряющую разность потенциалов равна v .

Импульс, который приобрела пылинка в результате прохождения через ускоряющую разность потенциалов равен p .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 8):

Таблица 8

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m , кг.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N	5	20	10	50	30	70	60	40	100	90
U , МВ	600	100	300	200	500	450	120	800	640	400
W , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
v , м/с	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
p , м/с	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

1.3 Электрическое поле при наличии проводников и диэлектриков. Конденсаторы. Энергия электростатического поля.

1.3.1 Основные теоретические понятия и формулы

Электрическим диполем называется система двух равных по модулю разноимённых точечных зарядов $(+q, -q)$ расстояние l между которыми значительно меньше расстояния до рассматриваемых точек поля ($l \ll r$)

Электрический момент диполя (дипольный момент)

$$\vec{p} = |q|\vec{l} \quad (46)$$

где $\vec{l}$ - плечо диполя - вектор направленный по оси диполя от отрицательного заряда к положительному и равный расстоянию между ними, электрический момент диполя.

Напряжённость и потенциал поля диполя на продолжении оси диполя:

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2p_e}{r_1^3}, \varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_e}{r^2} \quad (47)$$

Напряжение и потенциал на перпендикуляре, восстановленном к оси диполя из его середины:

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_e}{(r_2)^2}, \varphi_2 = 0 \quad (48)$$

Диэлектриками называются вещества, которые при обычных условиях практически не проводят электрический ток.

Различают три типа диэлектриков:

1) **Диэлектрики с неполярными молекулами**, симметричные молекулы которых в отсутствии внешнего поля имеют нулевой дипольный момент (N_2, O_2)

2) **Диэлектрики с полярными молекулами**, молекулы которых вследствие асимметрии имеют ненулевой дипольный момент

3) **Ионные диэлектрики** – ионные кристаллы представляют собой пространственные решётки с правильным чередованием ионов разных знаков.

Различают три вида поляризации:

1) **Электронная или деформационная поляризация диэлектриков** – за счёт деформации электронных орбит возникает индуцированный дипольный момент у атомов или молекул диэлектрика

2) **Ориентационная или дипольная поляризация диэлектрика с полярными молекулами** – ориентация имеющихся дипольных моментов молекул по полю.

3) **Ионная поляризация диэлектрика с ионными кристаллическими решётками** – смещение подрешётки положительных ионов вдоль поля, п отрицательных ионов против поля приводит к возникновению дипольных моментов.

Поляризованность $\vec{P}$ – дипольный момент единицы объёма:

$$\vec{P} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V} \quad (49)$$

где V - объём диэлектрика,

$\vec{p}_i$ - дипольный момент i -й молекулы.

Связь между поляризованностью диэлектрика и напряжённостью электростатического поля:

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} \quad (50)$$

где χ - диэлектрическая восприимчивость вещества.

Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью:

$$\varepsilon = 1 + \chi \quad (51)$$

Связь между напряжённостью E поля в диэлектрике и напряжённостью E_0 в вакууме:

$$E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0}, \quad (52)$$

или:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad (53)$$

Связь между векторами электрического смещения и напряжённостью электрического поля

$$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} \quad (54)$$

Связь между $\vec{D}$, $\vec{E}$ и $\vec{P}$:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (55)$$

Теорема Гаусса для электростатического поля в диэлектрике:

$$\Phi_D = \oint_S \vec{D} d\vec{S} = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (56)$$

Напряжённость электростатического поля у поверхности проводника:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} \quad (57)$$

где σ - поверхностная плотность зарядов.

Сегнетоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, у которых в отсутствие внешнего электрического поля возникает самопроизвольная ориентация дипольных электрических моментов составляющих его частиц.

Сегнетоэлектрики состоят из **доменов** – областей с различными направлениями поляризованности.

Температура, выше которой исчезают сегнетоэлектрические свойства – **точка Кюри**.

Для сегнетоэлектриков наблюдается явление диэлектрического гистерезиса – сохранения остаточной поляризованности при снятии внешнего поля.

Пьезоэлектрики – это кристаллические диэлектрики, в которых при сжатии или растяжении возникает электрическая поляризация – **прямой пьезоэффект**.

Обратный пьезоэффект – это появление механической деформации под действием электрического поля.

Ёмкость уединённого проводника:

$$C = \frac{Q}{\varphi} \quad (58)$$

где Q - заряд сообщённый проводнику,
 φ - потенциал проводника.

Ёмкость уединённого проводящего шара

$$C = 4\pi\epsilon_0 R \quad (59)$$

Ёмкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \quad (60)$$

где S - площадь каждой пластины конденсатора,
 d - расстояние между пластинами.

Ёмкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 \epsilon l}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (61)$$

где l - длина обкладок конденсатора,
 r_1, r_2 - радиусы полых коаксиальных цилиндров.

Ёмкость сферического конденсатора

$$C = 4\pi\epsilon_0 \epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \quad (62)$$

где r_1, r_2 - радиусы концентрических сфер.

Ёмкость системы конденсаторов соответственно при последовательном

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (63)$$

и параллельном соединении

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (64)$$

где C_i - электроёмкость i – го конденсатора,
 n - число конденсаторов.

Энергия W уединённого заряженного проводника:

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{Q\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C} \quad (65)$$

Энергия W взаимодействия системы точечных зарядов:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i \varphi_i \quad (66)$$

где φ_i - потенциал создаваемый в той точке где находится заряд Q_i всеми зарядами кроме i – го.

Энергия W заряженного конденсатора:

$$W = \frac{C \cdot (\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{Q \cdot \Delta\varphi}{2} = \frac{Q^2}{2C} \quad (67)$$

где Q - заряд конденсатора,
 C - его ёмкость,
 $\Delta\varphi$ - разность потенциалов между обкладками.

Пондеромоторная сила – это сила притяжения между двумя разноимённо заряженными обкладками конденсатора:

$$|F| = \frac{Q^2}{2\varepsilon_0\varepsilon S} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0\varepsilon} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2 S}{2} \quad (68)$$

Энергия W электростатического поля плоского конденсатора:

$$W = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0\varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} V \quad (69)$$

Объёмная ϖ плотность энергии:

$$\varpi = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2} \quad (70)$$

где D - вектор электрического смещения.

1.3.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 9.

Расстояние между зарядами Q диполя равно l . Электрический момент диполя равен p . Напряжённость электростатического поля диполя и потенциал в точке A , которая находится на продолжении оси диполя, удалённой на расстояние r от середины диполя как равны соответственно E_A и φ_A . (см Рисунок 8). Напряжённость поля в точке B на перпендикуляре, восстановленном к оси диполя из его середины равна E_B . Расстояние от середины диполя до точки B равно r' .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 9):

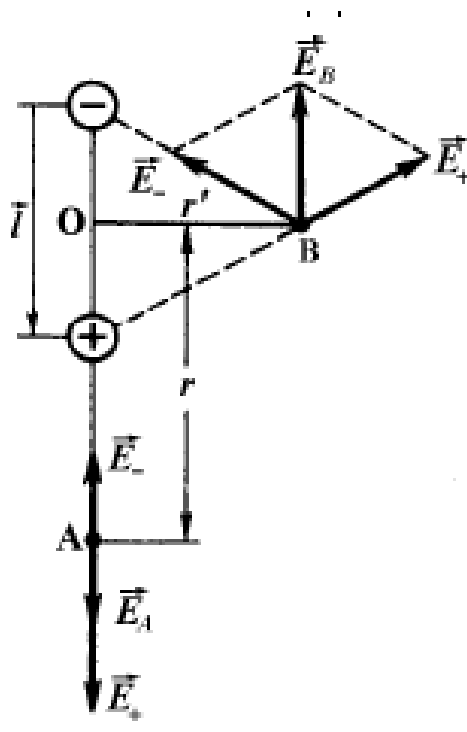


Рисунок 8

Таблица 9

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q , нКл	$\pm 1,6$	± 2	± 3	± 6	± 8	± 7	± 12	± 5	± 10	± 4
l , см	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88
r , см	20	15	20	25	30	35	40	45	50	55
r' , см	80	30	40	40	50	70	90	120	75	80
p , Кл · м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_A , В/м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
φ_A , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E_B , В/м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Пример решения 1 варианта**Дано:**

$$Q = \pm 1 \text{ нКл} = \pm 1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл.}$$

$$l = 16 \text{ см} = 0,16 \text{ м}$$

$$r = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$$

$$r' = 80 \text{ см} = 0,8 \text{ м}$$

Найти:

$$p_e - ?$$

$$E_A - ?$$

$$\varphi_A - ?$$

$$E_B - ?$$

Решение.

Определим модуль электрического момента диполя используя формулу:

$$\vec{p}_e = |Q| \cdot \vec{l}$$

Рассчитаем его:

$$p_e = 1 \cdot 10^{-9} \cdot 0,16 = 0,16 \cdot 10^{-9} (\text{Кл} \cdot \text{м})$$

Найдём напряжённость поля диполя на продолжении оси диполя в точке А:

$$E_A = E_+ - E_-$$

Из чего следует, если принять во внимание то что $r \gg l$:

$$E_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2p_e}{r^3}$$

Подставим в полученную формулу численные значения и выполним вычисления:

$$E_A = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \cdot \frac{2 \cdot 0,16 \cdot 10^{-9}}{0,5^5} = 23(\text{В/м})$$

Определим потенциал поля диполя в точке А:

$$\varphi_A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{Q}{r - \frac{l}{2}} - \frac{Q}{r + \frac{l}{2}} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_e}{r^2}$$

Подставляем численные значения и вычисляем:

$$\varphi_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,16 \cdot 10^{-9}}{0,5^2} = 5,76(\text{В})$$

Найдём напряжённость поля диполя в точке В на перпендикуляре, восстановленном к оси диполя из его середины при $r' \gg l$:

$$E_+ = E_- = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(r')^2 + (l/2)^2} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{(r')^2}$$

Примем во внимание то, что:

$$\frac{E_B}{E_+} \approx \frac{l}{r'},$$

Поэтому:

$$E_B = (E_+) \cdot \frac{l}{r'} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ql}{(r')^3} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_e}{(r')^3}$$

Подставим численные значения и получим:

$$E_B = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p_e}{(r')^3} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,16 \cdot 10^{-9}}{0,8^3} = 2,8(\text{В/м})$$

Ответ:

$$p_e = 0,16 \cdot 10^{-9}(\text{Кл} \cdot \text{м})$$

$$E_A = 23(\text{В/м})$$

$$\varphi_A = 5,76(\text{В})$$

$$E_B = 2,8(\text{В/м})$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 10

Батарея конденсаторов состоящая из конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 подключена к источнику тока с напряжением U . Заряд каждого конденсатора в отдельности равен Q_1, Q_2, Q_3 соответственно. Напряжение на каждом конденсаторе равно U_1, U_2, U_3 соответственно. Рассмотреть случаи, если они соединены:

1) параллельно,

2) последовательно.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 10):

Таблица 10

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_1 , мкФ	120	90	100	60	270	300	180	900	50	12
C_2 , мкФ	60	30	300	20	90	600	90	450	150	6
C_3 , мкФ	40	45	150	30	45	200	60	300	75	4
C , мкФ	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U , В	10	90	40	50	120	240	320	600	1200	20
Q_1 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Q_1 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Q_1 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_1 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_2 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_3 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Пример решения 1 варианта:**Дано:**

$$C_1 = 120 \text{ мкФ} = 120 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_2 = 60 \text{ мкФ} = 60 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C_3 = 40 \text{ мкФ} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$U = 10 \text{ В}$$

Найти:

C—?

 Q_1 —? Q_2 —? Q_3 —? U_1 —? U_2 —? U_3 —?**Решение.**

1) Рассмотрим параллельное соединение конденсаторов. В случае параллельного соединения конденсаторов полная ёмкость батареи находится по формуле:

$$C = \sum_{i=1}^3 C_i$$

Подставим численные значения и получим:

$$C = \sum_{i=1}^3 C_i = 120 \cdot 10^{-6} + 60 \cdot 10^{-6} + 40 \cdot 10^{-6} = 220 \cdot 10^{-6} = 200(\text{мкФ})$$

Разность потенциалов на обкладках конденсаторов одинакова и равна напряжению на зажимах батареи, то есть:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U = 10(\text{В})$$

Рассчитаем заряд каждого конденсатора в отдельности, используя формулу:

$$Q = C \cdot U$$

Подставим численные значения для первого конденсатора и получим:

$$Q_1 = C_1 \cdot U_1 = 120 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 1,2 \cdot 10^{-3} = 1,2 (\text{мКл})$$

Подставим численные значения для второго конденсатора и получим:

$$Q_2 = C_2 \cdot U_2 = 60 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 0,6 \cdot 10^{-3} = 0,6 (\text{мКл})$$

Подставим численные значения для третьего конденсатора и получим:

$$Q_3 = C_3 \cdot U_3 = 40 \cdot 10^{-6} \cdot 10 = 0,4 \cdot 10^{-3} = 0,4 (\text{мКл})$$

2) Рассмотрим последовательное соединение конденсаторов.

Общая ёмкость такой батареи находится по следующей формуле:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{C_i}$$

Подставим численные значения и получим:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{120 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{60 \cdot 10^{-6}} + \frac{1}{40 \cdot 10^{-6}} = \frac{6}{120 \cdot 10^{-6}}$$

Тогда общая ёмкость будет равна:

$$C = \frac{120 \cdot 10^{-6}}{6} = 20(\text{мкФ})$$

У последовательно соединённых конденсаторов C_1, C_2, C_3 заряды Q равны по модулю и суммарная разность потенциалов равна:

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

Откуда найдём заряды на конденсаторах:

$$Q = U \cdot C$$

Подставим численные значения и получим:

$$Q = 10 \cdot 20 \cdot 10^{-6} = 200(\text{мкКл})$$

Тогда, можно записать:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = 200(\text{мкКл})$$

Определим разность потенциалов на каждом из конденсаторов по формуле:

$$U_i = \frac{Q}{C_i}$$

Подставим численные значения и получим соответственно для первого конденсатора:

$$U_1 = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{120 \cdot 10^{-6}} = 1,67(\text{В})$$

Для второго конденсатора:

$$U_2 = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{60 \cdot 10^{-6}} = 3,33(\text{В})$$

Для третьего конденсатора:

$$U_3 = \frac{200 \cdot 10^{-6}}{40 \cdot 10^{-6}} = 5(\text{В})$$

Проверим, при последовательном соединении должно выполняться равенство:

$$U = \sum_{i=1}^3 U_i = 1,67 + 3,33 + 5 = 10(\text{В})$$

Равенство выполняется, следовательно, разности потенциалов на отдельных конденсаторах, найдены верно.

Ответ:

1) Параллельное соединение

$$C = 220(\text{мкФ})$$

$$Q_1 = 1,2 (\text{мКл})$$

$$Q_2 = 0,6 (\text{мКл})$$

$$Q_3 = 0,4 (\text{мКл})$$

$$U_1 = 10(\text{В})$$

$$U_2 = 10(\text{В})$$

$$U_3 = 10(\text{В})$$

2) Последовательное соединение

$$C = 20(\text{мкФ})$$

$$Q_1 = 200 (\text{мКл})$$

$$Q_2 = 200 (\text{мКл})$$

$$Q_3 = 200 (\text{мКл})$$

$$U_1 = 1,67(\text{В})$$

$$U_2 = 3,33(B)$$

$$U_3 = 5(B)$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

1.3.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 11.

Расстояние между пластинами плоского конденсатора равно d , Площадь пластин равна S . Разность потенциалов равна U . Ёмкость плоского конденсатора равна C . Заряд каждой пластины равен Q . Энергия поля конденсатора равна W . Сила взаимного притяжения пластин конденсатора равна F . Объёмная плотность энергии электростатического поля плоского конденсатора равна ϖ .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 11):

Таблица 11.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q , нКл.	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
d , см	2	1	3	4	0,2	5	0,4	0,5	0,1	8
U , кВ	6	5	4	3	1	8	10	0,5	0,1	16
C , мкФ	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Q , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
F , мН	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ϖ , Дж/м ³	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Задача 12

Конденсаторы ёмкостями C_1, C_2, C_3, C_4 соединены так, как показано на рисунке 9. Ёмкость батареи конденсаторов равна C . Разность потенциалов между точками А и В равно U . Разности потенциалов на каждом из конденсаторов равны соответственно U_1, U_2, U_3, U_4 . Заряд каждого из конденсаторов равен соответственно Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 . Энергия каждого из конденсаторов в батарее равна соответственно W_1, W_2, W_3, W_4 . Энергия батареи равна W .

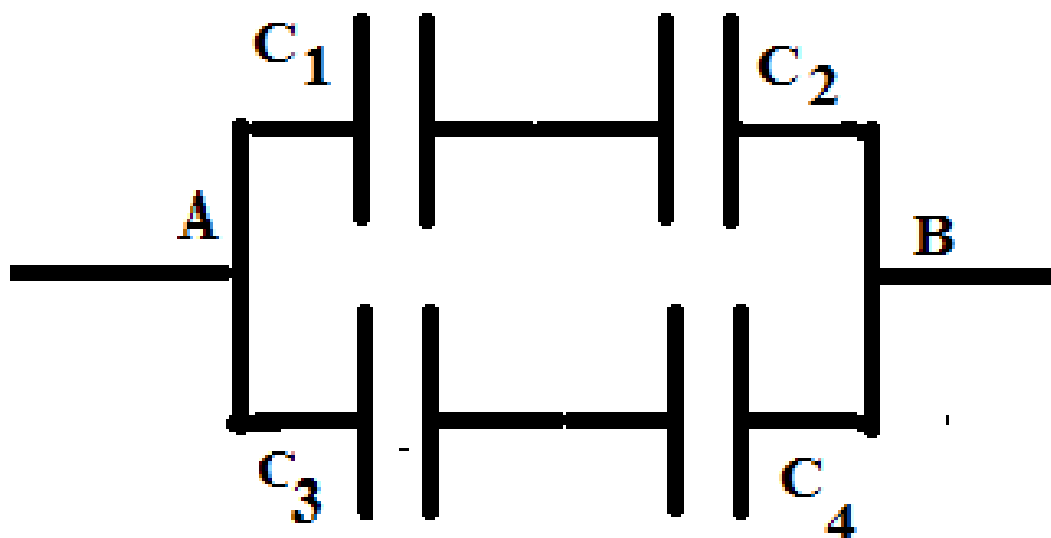


Рисунок 9.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 12):

Таблица 12

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C_1 , мкФ	120	90	100	60	270	300	180	900	50	12
C_2 , мкФ	60	30	300	20	90	600	90	450	150	6
C_3 , мкФ	40	45	150	30	45	200	60	300	75	4
C_4 , мкФ	120	90	300	6	180	200	120	100	150	12
C , мкФ	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U, В$	10	120	500	200	300	600	800	400	60	40
Q_1 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Q_2 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Q_3 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Q_4 , мкКл	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_1, В$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_2, В$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_3, В$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_4, В$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W_1 , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W_2 , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W_3 , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W_4 , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
W , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

2. Постоянный электрический ток.

2.1 Основные законы постоянного тока.

2.1.1 Основные теоретические понятия и формулы

Электрическим током называется упорядоченное движение электрического заряда

За **направление тока** принимают направление движения положительных зарядов.

Электрический ток, который не меняется со временем по величине и направлению называется постоянным электрическим током.

Сила постоянного тока I есть скалярная физическая величина, численно равная количеству электричества, прошедшему через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (71)$$

или

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (73)$$

Единица силы тока – ампер (А)

Плотность электрического тока j есть векторная физическая величина, численно равная силе тока, приходящейся на единицу площади поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S} \quad (74)$$

или

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \vec{k} \quad (75)$$

где $\vec{k}$ - единичный вектор по направлению совпадающий с направлением движения положительных зарядов.

Плотность тока в проводнике:

$$\vec{j} = ne \langle \vec{v} \rangle \quad (76)$$

где n – концентрация зарядов,

$\langle \vec{v} \rangle$ – скорость упорядоченного движения зарядов

Единица плотности тока - A/m^2 .

Для возникновения электрического тока необходимо:

- наличие свободных носителей тока – заряженных частиц, способных перемещаться упорядоченно.

- наличие электрического поля, энергия которого должна каким-то образом восполняться.

Для существования постоянного тока необходимо наличие в цепи устройства, способного создавать и поддерживать разность потенциалов за счёт сил не электростатического происхождения, такие устройства называются **источниками тока**.

Силы не электростатического происхождения, действующие на заряды со стороны источников тока называются **сторонними**.

Физическая величина, определяемая работой, которую совершают сторонние силы при перемещении единичного положительного заряда называется **электродвижущей силой (ЭДС)** действующей в цепи:

$$\Theta = \frac{A}{q_0} \quad (77)$$

Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется **однородным**.

Участок, на котором на носители тока действуют сторонние силы называется **неоднородным**.

Работа сторонних сил по перемещению заряда q_0 на замкнутом участке цепи:

$$A = \oint \vec{F}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{l} = q_0 \oint \vec{E}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{l} \quad (79)$$

ЭДС действующая в замкнутой цепи - это циркуляция вектора напряжённости поля сторонних сил:

$$\Theta = \oint \vec{E}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{l} \quad (80)$$

Циркуляция вектора напряжённости сторонних сил по замкнутому контуру не равна нулю, поэтому ***поле сторонних сил непотенциально.***

ЭДС действующая на участке 1-2 цепи равна

$$\Theta_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{стор.}} \cdot d\vec{l} \quad (81)$$

Напряжение U на участке 1 – 2 называется физическая величина, численно равная суммарной работе совершаемой электростатическими и сторонними силами по перемещению единичного положительного заряда на данном участке цепи:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12} \quad (82)$$

Напряжение на концах участка цепи равно разности потенциалов, если участок не содержит источника тока.

Сопротивление R однородного проводника длиной l и одинаковой по всей длине площадью поперечного сечения S вычисляется по формуле:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (83)$$

где ρ - удельное сопротивление проводника

Сопротивление проводника измеряется в Омах (Ом)

Удельное сопротивление проводника измеряется в (Ом · м)

Сопротивление проводника с переменным сечением вычисляется интегрированием выражения:

$$dr = \frac{dl}{S} \quad (84)$$

Величина, обратная электрическому сопротивлению называется электрической проводимостью:

$$G = \frac{1}{R} \quad (85)$$

Электрическая проводимость измеряется в сименсах (См.)

Удельная проводимость γ связана с удельным сопротивлением соотношением:

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (86)$$

Единица измерения удельной проводимости – (См/м)

Закон Ома в дифференциальной форме

– связывает плотность тока в любой точке внутри проводника с напряжённостью электрического поля в той же точке:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (87)$$

Закон Ома для участка цепи, не содержащей источников тока.

Сила тока I в цепи, не содержащей источников тока, пропорциональна разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ на концах проводника и обратно пропорциональна сопротивлению R проводника:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad (88)$$

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (89)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление при 0°C ,
 ρ - удельное сопротивление при температуре $t^\circ\text{C}$,
 α - температурный коэффициент сопротивления.

Зависимость сопротивления проводника от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (90)$$

где R_0 - сопротивление при 0°C ,
 R - сопротивление при температуре $t^\circ\text{C}$,
 α - температурный коэффициент сопротивления.

Общее сопротивление R проводников, соединённых последовательно, равно сумме сопротивлений отдельных проводников:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i, I_1 = I_2 = \dots = I_n = I = \text{const}, U = \sum_{i=1}^n U_i \quad (91)$$

Общая проводимость проводников, соединённых параллельно, равна сумме проводимостей отдельных проводников:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, U_1 = U_2 = \dots = U_n = U = \text{const}, I = \sum_{i=1}^n I_i \quad (92)$$

Работа по перемещению заряда q_0 между двумя точками поля равна:

$$A_{12} = q_0 \Delta \varphi \quad (93)$$

откуда:

$$dA = U dq = IU dt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt \quad (94)$$

Мощность тока:

$$P = \frac{dA}{dt} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (95)$$

Закон Джоуля – Ленца(в интегральной форме):

количество теплоты, выделяемое постоянным электрическим током на участке цепи, равно произведению квадрата силы тока на время его прохождения и электрическое сопротивление этого участка цепи:

$$Q = \int_0^t IR^2 dt = I^2 R t \quad (96)$$

Удельной тепловой мощностью тока ϖ называется количество теплоты, выделяющееся за единицу времени в единице объёма:

$$\varpi = \frac{dQ}{dV dt} = \rho j^2 \quad (97)$$

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме:

$$\varpi = \gamma E = jE^2 \quad (98)$$

Закон Ома для неоднородного участка цепи в интегральной форме:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12} \quad (99)$$

или

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \Theta_{12}}{R} \quad (100)$$

Частные случаи:

Если на данном участке цепи источник тока отсутствует, то мы получаем **закон Ома для однородного участка цепи:**

$$I = \frac{U}{R} \quad (101)$$

Если цепь замкнута, $\Delta\varphi = 0$, то **получаем закон Ома для замкнутого контура, содержащего э.д.с. (закон Ома для всей цепи):**

Сила тока I в замкнутом контуре, содержащем э.д.с., прямо пропорциональна э.д.с. источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений R внешней части контура и внутреннего сопротивления r самого источника:

$$I = \frac{\Theta}{R + r} \quad (102)$$

Если цепь разомкнута, то $I = 0$ и $\Theta_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$, то есть ЭДС действующая в разомкнутой цепи равна разности потенциалов на её концах

В случае короткого замыкания сопротивление внешней цепи $R_{\text{внеш.}} = 0$ и сила тока $I = \frac{\Theta}{r_{\text{внутр.}}}$ в этом случае ограничивается только величиной внутреннего сопротивления источника тока.

Правила Кирхгофа для разветвлённых цепей:

1-й закон (правило) Кирхгофа:

Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (103)$$

Узлом называется точка, в которой сходятся три и более проводников.

Токи, направленные к узлу, берутся со знаком «плюс», токи, направленные от узла, берутся со знаком «минус».

2-й закон (правило) Кирхгофа:

В любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений (т.е. произведений сил токов I_i на соответствующее сопротивление R_i) равна алгебраической сумме э.д.с., имеющих в этом контуре:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^m \mathcal{E}_i \quad (104)$$

Закон Ома в дифференциальной форме:

Плотность тока $\vec{j}$ пропорциональна напряжённости $\vec{E}$ электрического поля в проводнике:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (105)$$

где γ - удельная проводимость.

Закон Джоуля - Ленца в дифференциальной форме:

Объёмная плотность тепловой мощности, т.е. энергия, выделяемая в единицу времени в единицу объёма проводника при прохождении по нему тока, пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля:

$$\varpi = jE = \gamma E^2 \quad (106)$$

2.1.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 13

Общее напряжение на участке цепи равно U . Эквивалентное сопротивление смешанного сопротивления проводников равно R . Сила тока текущая через участок цепи равна I . Токи, текущие через каждое из сопротивлений на данном участке цепи равны соответственно I_1, I_2, I_3, I_4 . Напряжение на каждом из сопротивлений равны соответственно: U_1, U_2, U_3, U_4 , Мощность на каждом сопротивлении равна соответственно P_1, P_2, P_3, P_4 , общая мощность участка цепи равна P . Сопротивления равны соответственно R_1, R_2, R_3, R_4 . Проводимости резисторов, составляющих электрическую цепь равны соответственно: G_1, G_2, G_3, G_4 . Общая проводимость электрической цепи равна G . Электрическая схема приведена на рисунке 10:

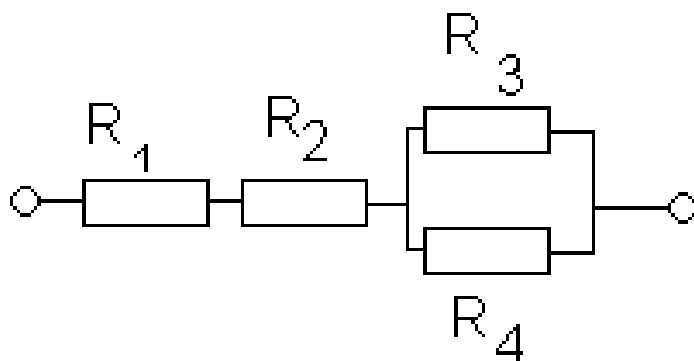


Рисунок 10

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 13):

Таблица 13.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1, \text{ Ом}$	10	20	15	35	20	20	4	20	5	30
$R_2, \text{ Ом}$	30	8	15	5	5	40	6	10	20	10
$R_3, \text{ Ом}$	15	60	90	120	100	90	135	30	80	240
$R_4, \text{ Ом}$	30	15	45	60	300	180	270	60	80	80
$U, \text{ В}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$R, \text{ Ом}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I, \text{ А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_1, \text{ А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_2, \text{ А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_3, \text{ А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

I_4, A	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_1, B	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_2, B	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_3, B	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_4, B	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_1, B\Gamma.$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_2, B\Gamma.$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_3, B\Gamma.$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_4, B\Gamma.$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P, B\Gamma$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G, C\Gamma$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_1, C\Gamma$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_2, C\Gamma$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_3, C\Gamma$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_4, C\Gamma$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Пример решения первого варианта.

Дано:

$$R_1 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 30 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 15 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 30 \text{ Ом}$$

$$U = 100 \text{ В}$$

Найти:

$$R - ?$$

$$I - ?$$

$$I_1 - ?$$

$$I_2 - ?$$

$$I_3 - ?$$

$$I_4 - ?$$

$$P_1 - ?$$

$$P_2 - ?$$

$$P_3 - ?$$

$$P_4 - ?$$

$$P - ?$$

$$G_1 - ?$$

$$G_2 - ?$$

$$G_3 - ?$$

$$G_4 - ?$$

$$G - ?$$

Решение.

Определим эквивалентное сопротивление участка цепи, изображённого на рисунке 10. Сопротивления R_1 и R_2 соединены последовательно. Сопротивления R_3 и R_4 соединены параллельно, и их соединение последовательно с сопротивлениями R_1 и R_2 . Поэтому эквивалентное сопротивление участка цепи находится по следующей формуле:

$$R = R_1 + R_2 + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}$$

Подставим численные значения в формулу и получим:

$$R = R_1 + R_2 + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = 10 + 30 + \frac{15 \cdot 30}{15 + 30} = 50(\text{Ом.})$$

Определим общий ток, текущий через участок цепи. Поскольку участок цепи не содержит источника э.д.с. воспользуемся законом Ома для однородного участка цепи:

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

Подставим численные значения и получим:

$$I = \frac{100}{50} = 2(\text{А})$$

Определим токи, текущие через отдельные сопротивления. При последовательном соединении сопротивлений токи, текущие через эти сопротивления равны:

$$I = I_1 = I_2 = 2(\text{А})$$

При параллельном соединении двух сопротивлений ток в каждой из ветвей находится как произведение общего тока на сопротивление противоположной ветви, делённое на сумму сопротивлений ветвей. Тогда для ветви с сопротивлением R_3 запишем:

$$I_3 = I \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Соответственно для ветви с сопротивлением R_4 можно записать:

$$I_4 = I \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4}$$

Подставим численные значения и получим:

$$I_3 = I \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} = 2 \cdot \frac{30}{15 + 30} = 1,33(\text{A})$$

И:

$$I_4 = I \cdot \frac{R_3}{R_3 + R_4} = 2 \cdot \frac{15}{15 + 30} = 0,67(\text{A})$$

Проверим:

$$I = I_3 + I_4 = 1,33 + 0,67 = 2(\text{A})$$

Найдём напряжение на каждом сопротивлении участка, по закону Ома для однородного участка цепи:

$$U = I \cdot R$$

Напряжение на сопротивлении R_1 :

$$U_1 = I_1 \cdot R_1$$

Напряжение на сопротивлении R_2 :

$$U_2 = I_2 \cdot R_2$$

Напряжение на сопротивлении R_3 :

$$U_3 = I_3 \cdot R_3$$

Напряжение на сопротивлении R_4 :

$$U_4 = I_4 \cdot R_4$$

Подставим численные значения, выполним вычисления и получим:

Напряжение на сопротивлении R_1 :

$$U_1 = I_1 \cdot R_1 = 2 \cdot 10 = 20(\text{В})$$

Напряжение на сопротивлении R_2 :

$$U_2 = I_2 \cdot R_2 = 2 \cdot 30 = 60(\text{В})$$

Напряжение на сопротивлении R_3 :

$$U_3 = I_3 \cdot R_3 = 1,33 \cdot 15 = 20(\text{В})$$

Напряжение на сопротивлении R_4 :

$$U_4 = I_4 \cdot R_4 = 0,67 \cdot 30 = 20(\text{В})$$

Проверка:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 20 + 60 + 20 = 100(\text{В})$$

$$U_3 = U_4 = 20(\text{В})$$

Определим электрическую мощность, которая выделяется на каждом из сопротивлений участка по закону Джоуля-Ленца:

$$P = I \cdot U$$

Мощность на сопротивлении R_1 :

$$P_1 = I_1 \cdot U_1$$

Мощность на сопротивлении R_2 :

$$P_2 = I_2 \cdot U_2$$

Мощность на сопротивлении R_3 :

$$P_3 = I_3 \cdot U_3$$

Мощность на сопротивлении R_4 :

$$P_4 = I_4 \cdot U_4$$

Подставим численные значения и получим:

Мощность на сопротивлении R_1 :

$$P_1 = I_1 \cdot U_1 = 2 \cdot 20 = 40(\text{Вт})$$

Мощность на сопротивлении R_2 :

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 = 2 \cdot 60 = 120(\text{Вт})$$

Мощность на сопротивлении R_3 :

$$P_3 = I_3 \cdot U_3 = 1,33 \cdot 20 = 26,6(\text{Вт})$$

Мощность на сопротивлении R_4 :

$$P_4 = I_4 \cdot U_4 = 0,67 \cdot 20 = 13,4(\text{Вт})$$

Мощность на всём участке цепи:

$$P = I \cdot U = 2 \cdot 100 = 200(\text{Вт.})$$

Проверка:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Подставим численные значения и проверим:

$$200 = 40 + 120 + 26,6 + 13,4$$

Определим электрические проводимости:

$$G_1 = \frac{1}{R_1}$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2}$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3}$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4}$$

$$G = \frac{1}{R}$$

Подставим численные значения и получим:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{10} = 0,1(\text{См})$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{30} = 0,03(\text{См})$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{15} = 0,07(\text{См})$$

$$G_4 = \frac{1}{R_4} = \frac{1}{30} = 0,03(\text{См})$$

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{50} = 0,02(\text{См})$$

Ответ:

$$R = 50(\text{Ом.})$$

$$I = 2(\text{А})$$

$$I = I_1 = I_2 = 2(\text{А})$$

$$I_3 = 1,33(\text{А})$$

$$I_4 = 0,67(\text{А})$$

$$P_1 = 40(\text{Вт})$$

$$P_2 = 120(\text{Вт})$$

$$P_3 = 26,6(\text{Вт})$$

$$P_4 = 13,4(\text{Вт})$$

$$P = 200(\text{Вт.})$$

$$G_1 = 0,1(\text{См})$$

$$G_2 = 0,03(\text{См})$$

$$G_3 = 0,07(\text{См})$$

$$G_4 = 0,03(\text{См})$$

$$G = 0,02(\text{См})$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 14.

Кусок провода с удельным сопротивлением ρ диаметром d и длиной l с площадью поперечного сопротивления S подключён к источнику питания. Сопротивление провода равно R . Разность потенциалов на концах провода равна U . Сила тока текущего в проводнике равна I . За время t на проводнике выделится W тепла. Мощность электрического тока равна P . Напряжённость электрического поля в проволоке равна E . Плотность электрического тока, текущего в проводнике равна j . Удельная тепловая мощность тока равна ϖ .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 14):

Таблица 14

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ , нОм · м	50	20	15	35	20	20	4	20	5	30
d , мм	1	8	15	5	5	40	6	10	20	10
l , м	50	60	90	120	100	90	135	30	80	240
S , мм ²	*	15	45	60	300	180	270	60	80	80
R , Ом	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U , В	1,6	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
I , А	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
t , с	300	10	40	15	70	12	6	500	200	100
W , Дж	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P , Вт	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
E , В/м	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
j , А/м ²	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ϖ , Вт/м ³	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Пример решения 1 варианта.

Дано:

$$\rho = 50 \text{ нОм} \cdot \text{м} = 50 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$d = 1 \text{ мм} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$l = 50 \text{ м}$$

$$U = 1,6 \text{ В}$$

Найти:

S —?

R —?

I —?

W —?

P —?

E —?

j —?

ϖ —?

Решение.

Определим площадь поперечного сечения провода:

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

Подставим численные значения и получим:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (1 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,785 \cdot 10^{-6} (\text{м}^2)$$

Найдём электрическое сопротивление провода:

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

Подставим численные значения и выполним вычисления:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = 50 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{50}{0,785 \cdot 10^{-6}} = 3,2 (\text{Ом})$$

Определим силу тока, текущего через провод, для этого воспользуемся законом Ома для однородного участка цепи:

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

Подставим численные значения и получим:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1,6}{3,2} = 0,5 (\text{А})$$

Используя закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме найдём теплоту, которая выделится в проводнике за время t :

$$W = U \cdot I \cdot t$$

Подставим численные значения и получим:

$$W = U \cdot I \cdot t = 1,6 \cdot 0,5 \cdot 300 = 240 (\text{Дж})$$

Мощность электрического тока в проводе равна:

$$P = U \cdot I$$

Подставим численные значения и получим:

$$P = U \cdot I = 1,6 \cdot 0,5 = 0,8(\text{Вт.})$$

Напряжённость электрического поля в проводе рассчитаем, используя формулу:

$$U = E \cdot l$$

Откуда получим:

$$E = \frac{U}{l} = \frac{1,6}{50} = 0,032(\text{В/м})$$

Найдём плотность тока в проводнике, используя закон Ома в дифференциальной форме:

$$j = \frac{E}{\rho}$$

Подставим численные значения и получим:

$$j = \frac{E}{\rho} = \frac{0,032}{50 \cdot 10^{-9}} = 0,64 \cdot 10^6(\text{А/м}^2)$$

Или, то же самое можно рассчитать:

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

Подставим численные значения и получим:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{0,5}{0,785 \cdot 10^{-6}} = 0,64 \cdot 10^6(\text{А/м}^2)$$

Определим удельную тепловую мощность тока по закону Джоуля – Ленца в дифференциальной форме:

$$\varpi = j \cdot E$$

Подставим численные значения и найдём:

$$\varpi = j \cdot E = 0,64 \cdot 10^6 \cdot 0,032 = 20 \cdot 10^3 (\text{Вт/м}^3)$$

Ответ:

$$S = 0,785 \cdot 10^{-6} (\text{м}^2)$$

$$R = 3,2 (\text{Ом})$$

$$I = 0,5 (\text{А})$$

$$W = 240 (\text{Дж})$$

$$P = 0,8 (\text{Вт.})$$

$$E = 0,032 (\text{В/м})$$

$$j = 0,64 \cdot 10^6 (\text{А/м}^2)$$

$$\varpi = 20 \cdot 10^3 (\text{Вт/м}^3)$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

2.1.3 Задачи для самостоятельного решения.

Задача 15.

Разность потенциалов между точками А и В равно U . Эквивалентное сопротивление смешанного сопротивления участка цепи между точками А и В равно R . Сила тока текущая через участок цепи равна I . Токи, текущие через каждое из сопротивлений на данном участке цепи равны соответственно $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$. Напряжение на каждом из сопротивлений равны соответственно: $U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$. Мощность на каждом сопротивлении равна соответственно $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$, общая мощность участка цепи равна P . Сопротивления равны соответственно $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$. Проводимости резисторов, составляющих электрическую цепь равны соответственно: $G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, G_6$. Общая проводимость электрической цепи равна G . Электрическая схема приведена на рисунке 11:

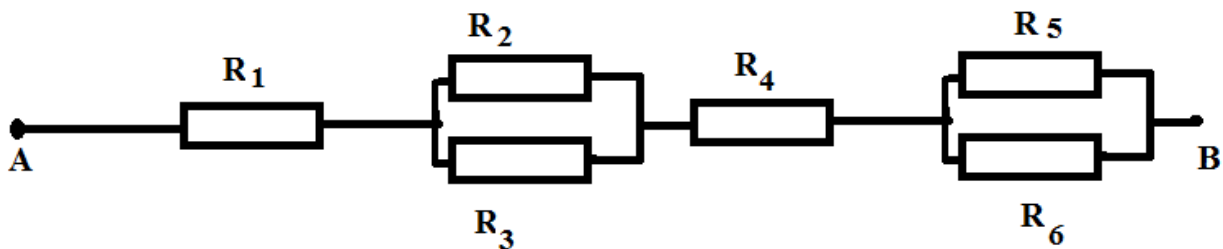


Рисунок 11

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 15):

Таблица 15

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_1, \text{Ом}$	10	20	15	35	20	20	4	20	5	30
$R_2, \text{Ом}$	30	8	15	5	5	40	6	10	20	10
$R_3, \text{Ом}$	15	60	90	120	100	90	135	30	80	240
$R_4, \text{Ом}$	30	15	45	60	300	180	270	60	80	80
$R_5, \text{Ом}$	12	60	30	6	90	150	200	120	300	240
$R_6, \text{Ом}$	4	15	6	30	45	75	50	60	150	240
$U, \text{В}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$R, \text{Ом}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_1, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_2, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_3, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_4, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_5, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I_6, \text{А}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_1, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_2, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_3, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_4, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_5, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U_6, \text{В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_1, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_2, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_3, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_4, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_5, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P_6, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P, \text{Вт}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_1, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_2, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_3, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_4, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_5, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$G_6, \text{См}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Задача 16.

Электрическая цепь, состоящая из источника тока и внешней цепи представлена на рисунке 12

Внутреннее сопротивление источника тока равно r .

Э.Д.С. источника равно θ .

К источнику поочерёдно подключают внешние цепи, сопротивлением R_1, R_2, R_3, R_4, R_5 .

При этом ток, текущий через источник равен соответственно: I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 .

Падения напряжения внутри источника равны U_1, U_2, U_3, U_4, U_5 .

Падение напряжения на внешней цепи равно соответственно $U'_1, U'_2, U'_3, U'_4, U'_5$.

Мощности, которые снимаются с источника равны P_1, P_2, P_3, P_4, P_5 .

Мощности, которые выделяются на внешней нагрузке равны $P'_1, P'_2, P'_3, P'_4, P'_5$.

Мощности, которые выделяются на внешней нагрузке равны $P''_1, P''_2, P''_3, P''_4, P''_5$.

К.П.Д. источника при различных нагрузках будет равно $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4, \eta_5$

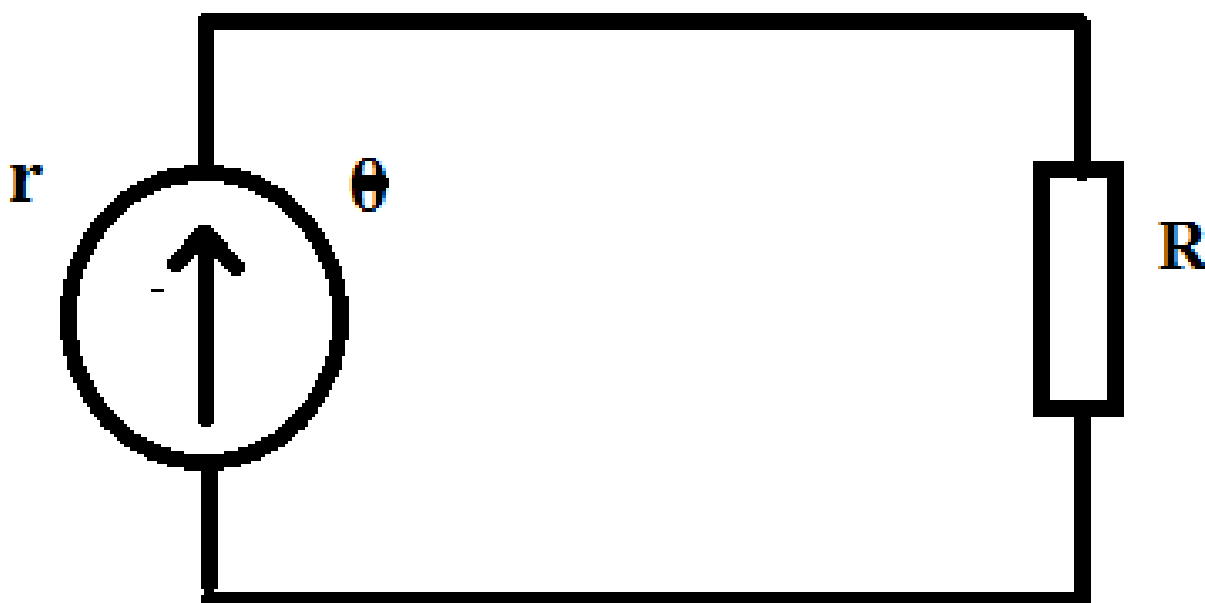


Рисунок 12

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 16):

Таблица 16

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r , Ом	10	20	15	35	20	20	4	20	5	30
θ , В	30	8	15	5	5	40	6	10	20	10
R_1 , Ом	50	80	55	25	60	100	44	30	95	70
R_2 , Ом	90	30	85	95	80	130	96	50	55	220
R_3 , Ом	15	60	90	120	100	90	136	30	80	240
R_4 , Ом	30	15	45	60	300	180	276	60	80	80
R_5 , Ом	10	20	15	35	20	20	4	20	5	30
I_1 , А	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
I_2 , А	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
I_3 , А	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
I_4 , А	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
I_5 , А	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_1 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_2 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_3 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_4 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U_5 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U'_1 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U'_2 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U'_3 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U'_4 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
U'_5 , В	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P_1 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
P_2 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P_3 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P_4 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P_5 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P'_1 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P'_2 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P'_3 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P'_4 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P'_5 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P''_1 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P''_2 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
P''_3 , Вт.	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Продолжение таблицы 16

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P''_4, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$P''_5, \text{Вт.}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\eta_1, \%$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\eta_2, \%$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\eta_3, \%$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\eta_4, \%$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\eta_5, \%$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

2.2 Ток в металлах, жидкостях и газах.

2.2.1 Основные понятия и формулы.

Плотность тока $\vec{j}$, средняя скорость $\langle \vec{v} \rangle$, упорядоченного движения носителей заряда и их концентрация n связаны соотношением:

$$\vec{j} = en\langle \vec{v} \rangle \quad (107)$$

Закон Ома в дифференциальной форме. Плотность тока $\vec{j}$ пропорциональна напряжённости $\vec{E}$ электрического поля в проводнике:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad (108)$$

где γ - удельная проводимость.

Закон Джоуля - Ленца в дифференциальной форме.

Объёмная плотность тепловой мощности, т.е. энергия, выделяемая в единицу времени в единицу объёма проводника при прохождении по нему тока, пропорциональна квадрату напряжённости электрического поля:

$$\varpi = jE = \gamma E^2 \quad (109)$$

Удельная электрическая проводимость

$$\gamma = 1/2 \cdot e^2 n \langle l \rangle / (m u) \quad (110)$$

где:

e – заряд электрона,

m – масса электрона,

n – концентрация электронов

$\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега электронов

u – средняя скорость хаотического движения электронов

Закон Видемана – Франца:

Отношение теплопроводности λ к удельной проводимости γ для всех металлов при одной и той же температуре одинаково и увеличивается пропорционально температуре:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \beta T \quad (111)$$

где $\beta = 3 \left(\frac{k}{e}\right)^2$

Термоэлектродвижущая сила E пропорциональна разности температур спаев $(T_1 - T_2)$ и логарифму отношения концентраций n_1/n_2 свободных электронов в металлах термопары:

$$\Theta = \frac{k}{l} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_1}{n_2} \quad (112)$$

Законы Фарадея для электролиза.

Первый закон:

$$m = k \cdot Q \quad (112)$$

где:

m – масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит электрического заряда Q .

k – электрохимический эквивалент вещества.

Второй закон:

$$k = M/(FZ) \quad (113)$$

где,

F - число Фарадея $F = 96,5 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ показывающее, какой заряд должен пройти через электролит для того, чтобы выделился один килограмм-эквивалент вещества,

M – молярная масса ионов данного вещества,

Z – валентность ионов.

Объединённый закон:

Масса m вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна химическому эквиваленту A/n , силе тока I , протекающего через электролит, и времени t прохождения тока:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} It \quad (114)$$

где F - число Фарадея $F = 96,5 \frac{\text{кКл}}{\text{моль}}$ показывающее, какой заряд должен пройти через электролит для того, чтобы выделился один килограмм-эквивалент вещества,

A - масса килоатома элемента (молярная масса ионов данного вещества),
 n - валентность элемента

Подвижность и ионов есть физическая величина, численно равная средней скорости $\langle v \rangle$, которую приобретает ион того или другого знака в поле с напряжённостью, равной единице напряжённости:

$$u = \frac{\langle v \rangle}{E} \quad (115)$$

формула справедлива для электролитов с одинаковым числом положительных и отрицательных ионов

Закон Ома в дифференциальной форме для электролитов и газов при самостоятельном разряде в области, далёкой от насыщения:

Плотность тока j в электролите пропорциональна напряжённости электрического поля E , сумме подвижностей отрицательных и положительных ионов ($u_+ + u_-$) и числу пар ионов в единице объёма электролита:

$$j = qn(u_+ + u_-)E \quad (116)$$

где q - заряд иона.

Плотность тока в газах определяется по формулам:

а) когда ток далёк от насыщения –

$$j = qn(u_+ + u_-)E \quad (117)$$

где q - заряд иона,

n - концентрация ионов (число ионов каждого знака в единице объёма),

u_+ и u_- - подвижности положительных и отрицательных ионов,

E - напряжённость поля;

б) при наступлении насыщения:

$$j_n = qn_0d \quad (118)$$

где n_0 - число пар ионов, создаваемых ионизатором в единице объёма в единицу времени,

d - расстояние между электродами.

$[n_0 = N/(Vt), \text{ где } N - \text{число пар ионов, создаваемых ионизатором, за время } t \text{ в пространстве между электродами, } V - \text{объём этого пространства}]$

Согласно теории Друде – Лоренца, электроны обладают той же энергией теплового движения, что и молекулы одноатомного газа:

Средняя скорость теплового движения электронов:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_e}} \quad (119)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана

$m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг – масса электрона

T - абсолютная (термодинамическая) температура.

Электронная эмиссия – явление испускания электронов из металлов при сообщении электронам энергии, равной или большей работы выхода.

Работа выхода электронов из металла – работа, которую нужно затратить для удаления электронов из металла в вакуум.

Виды электронной эмиссии:

- ***термоэлектронная эмиссия*** – испускание электронов нагретыми металлами

- ***фотозлектронная эмиссия*** – эмиссия электронов под действием электромагнитного излучения

- ***вторичная электронная эмиссия*** – испускание электронов поверхностью металлов, полупроводников или диэлектриков под действием электромагнитного излучения.

- ***автоэлектронная эмиссия*** – эмиссия электронов с поверхности металлов под действием сильного внешнего электромагнитного поля.

Газовым разрядом называется прохождение электрического тока через ионизированный газ.

Ионизация газа - это расщепление нейтральных молекул газа на ионы и свободные электроны под действием ионизатора (сильный нагрев, жёсткое излучение, потоки частиц)

Энергия ионизации – энергия, которую надо затратить, чтобы из молекулы (атома) выбить электрон.

Разряд, который существует лишь под действием внешних ионизаторов называется **несамостоятельным газовым разрядом**.

Разряд в газе, который сохраняется после прекращения действия внешнего ионизатора, называется **самостоятельным газовым разрядом**.

Напряжение, при котором возникает самостоятельный газовый разряд называется **напряжением пробоя**.

Различают 4 типа самостоятельного разряда:

- **тлеющий разряд** – возникает при низком давлении
- **искровой разряд** – возникает при большой напряжённости электрического поля
- **дуговой разряд** – возникает,
 - а) если после зажигания искрового разряда от мощного источника постепенно уменьшать расстояние между электродами,
 - б) минуя стадию искры, если электроды сначала сблизить до соприкосновения, а потом развести
- **коронный разряд**: возникает при высоком давлении в резко неоднородном поле вблизи электродов с большой кривизной поверхности

2.2.2 Примеры решения многовариантных задач.

Задача 17

По проводнику с удельным сопротивлением ρ , диаметр сечения которого равен d , течёт ток I . Площадь поперечного сечения проводника S . Плотность тока равна j . Средняя скорость движения электронов равна $\langle v \rangle$. Плотность проводника равна ρ' . Концентрация n свободных электронов равна концентрации n' атомов проводника.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 17):

Таблица 17

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ , Ом · м	98	20	15	35	20	20	4	20	5	30
d , мм	0,6	8	15	5	5	40	6	10	20	10
S , м ²	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
I , А	16	5	2	4	1	8	20	12	4	3
j , А/м ²	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\langle v \rangle$, мм/с	*	60	90	120	100	90	135	30	80	240
M , · 10 ⁻³ кг /моль	58	15	45	60	300	180	270	60	80	80

Пример решения 1 варианта.

Дано:

$$\rho = 98 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$d = 0,6 \text{ мм} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$I = 16 \text{ А}$$

$$M = 58 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

Найти:

$$S - ?$$

$$j - ?$$

$$\langle v \rangle - ?$$

Решение.

Определим площадь поперечного сечения проводника:

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

Подставим численные значения и получим:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,6 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,28 \cdot 10^{-6} (\text{м}^2)$$

Определим плотность тока, текущего в проводнике:

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

Подставим численные значения и получим

$$j = \frac{I}{S} = \frac{16}{0,28 \cdot 10^{-6}} = 57,1 \cdot 10^6 (\text{А/м}^2)$$

Средняя скорость направленного (упорядоченного) движения электронов определяется по формуле:

$$\langle v \rangle = l/t \quad (116)$$

где:

t – время, в течении которого все свободные электроны, находящиеся в отрезке проводника между сечениями I и II пройдя через сечение II перенесут заряд $Q = eN$ (см. рисунок 13)

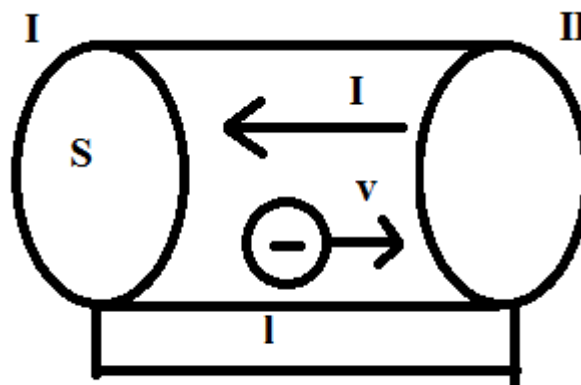


Рисунок 13

и создадут ток:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{eN}{t} \quad (117)$$

где

e – элементарный заряд

N – число электронов в отрезке проводника

l – его длина.

Число свободных электронов в отрезке проводника объёмом V можно выразить следующим образом:

$$N = nV = n l S \quad (118)$$

где

S – площадь сечения.

По условию задачи $n = n'$, следовательно:

$$n = n' = \frac{N_A}{M/\rho} = \frac{N_A \cdot \rho}{M} \quad (119)$$

где

N_A – постоянная Авогадро,

V_m – молярный объём металла,

M – молярная масса металла,

ρ – плотность металла

Тогда, подставим выражения для концентрации свободных электронов из формулы (119) и выражение для числа свободных электронов в отрезке проводника объёмом V из формулы (118) в равенство (117) и получим:

$$I = \frac{N_A \cdot \rho \cdot l \cdot S \cdot e}{M t}$$

Откуда найдём:

$$l = \frac{I M t}{N_A \cdot \rho \cdot S \cdot e}$$

Подставим выражение для l в формулу (116), сократив на t и выразив площадь S сечения проводника через диаметр d , найдём среднюю скорость направленного движения электронов:

$$\langle v \rangle = \frac{4 \cdot I \cdot M}{\pi \cdot d^2 \cdot N_A \cdot \rho \cdot e}$$

Произведём по этой формуле вычисления:

$$\langle v \rangle = \frac{4 \cdot 16 \cdot 56 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot (0,6 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 98 \cdot 10^{-9} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ (м/с)}$$

Ответ:

$$S = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}$$

$$j = 57,1 \cdot 10^6 \text{ (А/м}^2\text{)}$$

$$\langle v \rangle = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ (м/с)}$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

Задача 18

Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объём V . Площадь пластин плоского конденсатора равна S . Расстояние между пластинами конденсатора равно d . Напряжение между пластинами конденсатора равно U . Пространство между пластинами заполнено водородом, который частично ионизирован. Сила тока, протекающего через конденсатор равна I . Концентрация ионов обоих знаков в газе равна n . Напряжённость электрического поля между пластинами конденсатора равна E . Принять подвижность ионов $b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $b_- = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 18):

Таблица 18.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ см}^3$	500	200	150	350	200	120	400	300	1000	300
$d, \text{ мм}$	*	8	15	5	5	40	4	10	20	10
$S, \text{ см}^2$	250	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$I, \text{ мкА}$	16	10	5	2	8	3	4	1	20	30
$j, \text{ А/м}^2$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$U, \text{ В}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$E, \text{ В/м}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$n, \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$	5,3	2,6	4,2	1,8	8,2	3,6	7,2	0,3	2,8	6,8

Пример решения 1 варианта:

Дано:

$$V = 500 \text{ см}^3 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$S = 250 \text{ см}^2 = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

$$I = 16 \text{ мкА} = 16 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

$$n = 5,3 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} = 5,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$$

$$b_+ = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$$

$$b_- = 7,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$$

Найти:

$$d - ?$$

$$j - ?$$

$$U - ?$$

$$E - ?$$

Решение:

Найдём расстояние между пластинами конденсатора:

$$d = \frac{V}{S}$$

Подставим численные значения и получим:

$$d = \frac{V}{S} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{250 \cdot 10^{-4}} = 2 \cdot 10^{-2} (\text{м})$$

Напряжение на пластинах конденсатора связано с напряжённостью E электрического поля между пластинами конденсатора и расстоянием между ними соотношением:

$$U = Ed \quad (120)$$

Напряжённость электрического поля найдём из выражения для плотности тока:

$$j = Qn(b_+ + b_-)E,$$

Плотность тока находим по формуле:

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

Подставим численные значения и получим:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{16 \cdot 10^{-6}}{250 \cdot 10^{-4}} = 0,64 \cdot 10^{-3} (\text{А/м}^2)$$

Отсюда:

$$E = \frac{j}{Qn(b_+ + b_-)}$$

Подставим численные значения и получим:

$$E = \frac{j}{Qn(b_+ + b_-)} = \frac{0,64 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,3 \cdot 10^{13} \cdot (5,4 \cdot 10^{-4} + 7,4 \cdot 10^{-4})} = 59 (\text{кВ/м})$$

Откуда можно найти напряжение между пластинами:

$$U = E \cdot d$$

Подставим численные значения и получим:

$$U = E \cdot d = 59 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 1180 (\text{В})$$

Ответ:

$$d = 2 \cdot 10^{-2} (\text{м})$$

$$j = 0,64 \cdot 10^{-3} (\text{А/м}^2)$$

$$E = 59 (\text{кВ/м})$$

$$U = 1180 (\text{В})$$

Остальные варианты аналогичны варианту представленному выше. Некоторые из них могут являться обратной задачей. Учащимся предлагается решить их самостоятельно.

2.2.3 Задачи для самостоятельного решения

Задача 19.

Сила тока в металлическом проводнике с удельным сопротивлением ρ равна I . Диаметр проводника равен d . Площадь поперечного сечения проводника равна S . Плотность тока в проводнике равна j . Напряжённость электрического поля в проводнике равна E . Принимая, что число свободных электронов в единице объёма равно числу атомов металла, концентрация свободных электронов равна n . Средняя скорость упорядоченного движения электронов равна $\langle v \rangle$.

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 19):

Таблица 19.

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I, A	2	0,16	0,3	0,2	0,5	0,1	0,25	1,2	1,5	3
$d, \text{мм}$	*	0,8	1,5	0,5	0,5	4	3	1	2	1
$S, \text{см}^2$	0,01	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$n, \cdot 10^{23} \text{м}^{-3}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$j, A/\text{м}^2$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Металл	Au	Cu	Fe	Pt	Al	Ag	Zn	W	Ni	Cr
$E, B/\text{м}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\langle v \rangle, \text{м/с}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Задача 20

Через раствор в электролитической ванне протекает ток I , в течении времени t , в результате чего через раствор прошёл заряд Q . В электролитической ванне выделилось m металла с валентностью Z . Относительная атомная масса металла равна A .

Определите неизвестную физическую величину в соответствии с Вашим вариантом (см. Таблицу 20):

Таблица 20

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I, A	5	7	3	10	8	9	2	1	6	4
$t, \text{мин.}$	10	8	15	5	5	40	6	10	20	10
$Q, \text{Кл}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$m, \text{г}$	1,02	0,28	0,5	0,6	0,2	1,08	0,4	0,1	0,3	0,36
Z	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
A_r	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Заключение

Учебно-методическое пособие состоит из введения, двух разделов, заключения, приложений и списка литературы.

Каждый раздел в свою очередь разделён на несколько подразделов. Каждый из подразделов, в свою очередь делится на три основных части.

Первая часть каждого подраздела представляет из себя минимально необходимую подборку основных понятий, законов и формул, относящихся к изучаемой теме.

Вторая часть раздела включает в себя подробное решение нескольких вариантов многовариантной задачи с подробным выводом рабочей формулы и примером расчёта численного значения ответа. При этом отметим, что в целях экономии места во всех примерах приведены расчёты 1-2 вариантов, а не всех 5 – 10 возможных вариантов. Те варианты, которые не разобраны в примере решения учащимся следует решить самостоятельно.

Третья часть раздела представляет собой многовариантные задачи для самостоятельного решения. Число задач для самостоятельного решения в каждом разделе различно, но каждая задача представляет собой примерно 10 разных задач, поэтому общий объём заданий для самостоятельной работы учащихся получается значительным.

Примеры решения задач не ставят своей целью научить решению задач по физике. Это связано с тем, что научить решению задач по физике невозможно. Возможно только научиться решать задачи по физике при выполнении того условия, что учащийся будет самостоятельно решать задачи. При решении задач следует придерживаться некоторых общеизвестных правил:

- 1) Ознакомиться с приведёнными в начале раздела основными формулами и примерами решения задач

- 2) Несколько раз прочитать текст задачи и постараться вникнуть в её физический смысл. При необходимости полезно сделать схематический чертёж, например, направление движения тела, векторные величины, характеризующие это движение

- 3) Подумать, какие физические законы можно применить при решении данной задачи. Выяснить возможность применения законов сохранения.

- 4) Задачу следует вначале решить в общем виде, то есть получить алгебраическое выражение, содержащее буквенные обозначения физических величин, заданных в условии задачи, и буквенные обозначения постоянных.

- 5) Произвести проверку совпадения единиц измерения левой и правой части равенства.

- 6) Перед вычислением следует выразить все величины в единицах СИ.

- 7) Вычисления выполняют с точностью до трёх значащих цифр. С такой точностью заданы все физические величины в задачах и физические постоянные в таблицах. Как правило, вычисления выполняют с четырьмя значащими цифрами, а конечный результат округляют до трёх.

3. Приложения.

Таблица ПЗ.1

Плотность газов при нормальных условиях (кг/м³), (при 0⁰С и 101,3 нПа)

Азот	1,25	Двуокись углерода	1,47
Аммиак	0,77	Кислород	1,98
Аргон	1,78	Окись углерода	1,25
Водород	0,09	Пропан	2,2
Воздух	1,29	Светильный газ	0,55
Гелий	0,179	Хлор	3,22

Таблица ПЗ.2. Фундаментальные физические константы

Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Элементарный заряд	$e = 1,6021892(46) \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Удельный заряд электрона	$e/m = -1,7588047(49) \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Комптоновская длина волны электрона	$\lambda = 2,4263089(40) \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B = 9,274078(36) \cdot 10^{-24} \text{ Дж/Тл}$
Ядерный магнетон	$\mu_{\text{яд}} = 5,050824(20) \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$
Объем моля идеального газа при нормальных условиях ($T_0 = 273,15 \text{ К}$, $p_0 = 101325 \text{ Па}$)	$0,02241383(70) \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045(31) \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662(44) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/ К}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,31441(26) \text{ Дж/ моль} \cdot \text{ К}$

Постоянная Стефана -Больцмана	$\sigma = 5,67032(71) \cdot 10^{-8} \text{ Вт/ м}^2 \cdot \text{К}^4$
Гравитационная постоянная	$\gamma = 6,6720(41) \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/ \text{кг}^2$
Ускорение свободного падения	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 12,5663706144 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/ м}$
Электрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,854187 (7) \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Постоянная Ридберга	$R = 1,097373177(83) \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Постоянная излучения (первая)	$c_1 = 3,741832(20) \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$
Постоянная излучения (вторая)	$c_2 = 0,01438786(45) \text{ м} \cdot \text{К}$
Первый Боровский радиус	$a_0 = 0,52917706(44) \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Скорость света в вакууме	$c = 299792458 \text{ м/с}$
Энергия покоя нейтрона	$m_n c^2 = 939,5731(27) \text{ МэВ}$
Энергия покоя протона	$m_p c^2 = 938,2796(27) \text{ МэВ}$
Энергия покоя электрона	$m_e c^2 = 0,5110034(14) \text{ МэВ}$
Энергия, соответствующая 1 а.е.м.	$931,5016(26) \text{ МэВ}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,6749543(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726485(86) \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса покоя электрона	$m_e = 0,9109534(47) \cdot 10^{-30} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,626176(36) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ $\hbar = 1,0545887(57) \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Таблица ПЗ.4 Удельное сопротивление ρ проводников, температурный коэффициент α

Проводники	ρ , нОм · м	α , $^{\circ}\text{K}^{-1}$
Алюминий	26	4,5
Вольфрам	50	4,8
Графит	$3,9 \cdot 10^3$	-0,8
Железо	98	6,2
Золото	20	4,0
Медь	17	4,3
Свинец	190	4,2
Серебро	15	4,1

Таблица ПЗ.5 Удельное сопротивление изоляторов.

Изоляторы	ρ , Ом· м
Бумага	10^{10}
Парафин	10^{15}
Слюда	10^{13}
Фарфор	10^{13}
Шеллак	10^{14}
Эбонит	10^{14}
Янтарь	10^{17}

Таблица ПЗ.6 Диэлектрическая проницаемость среды

Вещество	ϵ
Вакуум	1,0
Воск	7,8
Воздух	1,000594
Керосин	2
Парафин	2,0
Силиконовое масло	2,2...2,8
Янтарь	2,2...2,9
Полиэтилен	2,3
Полистирол	2,3...2,5
Каучук	2,5...3,0
Эбонит	3
Плексиглас	3...4
Бакелит	3...5
Пертинакс	4...6
Сегнетовая соль	10000
Слюда	7
Фарфор	5
Вода дистиллированная	81
Игелит	5
Полихлорвинил	5
Стекло	7
Ацетон	21,4
Спирт этиловый	25,1
Спирт метиловый	33,5
Гетинакс	3,5...6
Керамика специальная	до 10^4

Таблица ПЗ.7 Элементы периодической системы

(Z - порядковый номер элемента; A - относительная атомная масса химического элемента (округленные значения))

Z	Элемент	Символ	A
1	Водород	H	1,01
2	Гелий	He	4,00
3	Литий	Li	6,94
4	Бериллий	Be	9,01
5	Бор	B	10,8
6	Углерод	C	12,00
7	Азот	N	14,0
8	Кислород	O	16,0
9	Фтор	F	19,0
10	Неон	Ne	20,2
11	Натрий	Na	23,0
12	Магний	Mg	24,4
13	Алюминий	Al	27,0
14	Кремний	Si	28,1
15	Фосфор	P	31,0
16	Сера	S	32,1
17	Хлор	Cl	35,5
18	Аргон	Ar	40,0
19	Калий	K	39,1
20	Кальций	Ca	40,1
21	Скандий	Sc	45,0
22	Титан	Ti	47,9
23	Ванадий	V	51,0
24	Хром	Cr	52,0
25	Марганец	Mn	54,9
26	Железо	Fe	55,9
27	Кобальт	Co	58,9
28	Никель	Ni	58,7
29	Медь	Cu	63,5
30	Цинк	Zn	65,4
31	Галлий	Ga	69,7
32	Германий	Ge	72,6
33	Мышьяк	As	74,9
34	Селен	Se	79,0
35	Бром	Br	79,9
36	Криптон	Kr	83,8

Продолжение Таблицы ПЗ.7 Элементы периодической системы

Z	Элемент	Символ	A
52	Теллур	Te	128
53	Йод	J	127
54	Ксенон	Xe	131
55	Цезий	Cs	133
56	Барий	Ba	137
57	Лантан	La	139
58	Церий	Ce	140
59	Празеодим	Pr	141
60	Неодим	Nd	144
61	Прометий	Pm	145
62	Самарий	Sm	150
63	Европий	Eu	152
64	Гадолиний	Gd	157
65	Тербий	Tb	159
66	Диспрозий	Dy	163
67	Гольмий	Ho	165
68	Эрбий	Er	167
69	Тулий	Tu	169
70	Иттербий	Yb	173
71	Лютеций	Lu	175
72	Гафний	Hf	178
73	Тантал	Ta	181
74	Вольфрам	W	184
75	Рений	Re	186
76	Осмий	Os	190
77	Ир		192
78	Платина	Pl	195
79	Золото	Au	197
80	Ртуть	Hg	201
81	Таллий	Tl	204
82	Свинец	Pb	207
83	Висмут	Bi	209
84	Полоний	Po	210
85	Астат	At	210
86	Радон	Rn	222
87	Франций	Fr	223

Продолжение Таблицы ПЗ.7 Элементы периодической системы

37	Рубидий	Rb	85,5
38	Стронций	Sr	87,6
39	Иттрий	Y	88,9
40	Цирконий	Zr	91,2
41	Ниобий	Nb	92,9
42	Молибден	Mo	96,0
43	Технеций	Tc	99
44	Рутений	Ru	101
45	Родий	Rh	103
46	Палладий	Pd	106
47	Серебро	Ag	108
48	Кадмий	Cd	112
49	Индий	In	115
50	Олово	Sn	119
51	Сурьма	Sb	122
88	Радий	Ra	226
89	Актиний	Ac	227
90	Торий	Th	232
91	Протактиний	Pa	231
92	Уран	U	238
93	Нептуний	Np	237
94	Плутоний	Pu	244
95	Амереций	Am	243
96	Кюрий	Cm	247
97	Берклий	Bk	249
98	Калифорний	Cf	249
99	Эйнштейний	Es	254
100	Фермий	Fm	262
101	Менделевий	Md	259

Таблица ПЗ.8 Десятичные приставки к названиям единиц

Т – тера (10^{12})	д – деци (10^{-1})	н – нано (10^{-9})
Г – гига (10^9)	с – санти (10^{-2})	п – пико (10^{-12})
М – мега (10^6)	м – милли (10^{-3})	ф – фемто (10^{-14})
к – кило (10^3)	мк – микро (10^{-6})	а – атто (10^{-18})

4.Список использованных источников

- 1) Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс физики.-М: Высшая школа, 1989.
- 2) Трофимова Е.Ф. Курс физики. –М:Высшая школа, 2001
- 3) Калашников Н.П. Основы физики в 2-х томах.-М: Дрофа:, 2004
- 4) Калашников Н.П. Смондырев М.А. Основы физики. Том 1 – М: Дрофа, 2003
- 5) Поезжалов В.М. Мищенко А.В. Справочно-методическое пособие для подготовки к тестированию по общей физике: Костанай – КГУ им. А. Байтурсынова, 2007
- 6) Ремизов А.Н. Потапенко А.Я. Курс физики – М: Дрофа, 2004
- 7) Грабовский Р.И. Курс физики – СПб: Лань 2005
- 8) Савельев И.В. Курс физики Том 1 – М: Наука, 1989
- 9) Курс физики /под ред. Лозовского В.Н./ СПб –М-Краснодар:Лань, 2003
- 10) Чертов А.Г. Воробьев А.А. Задачник по физике – М:Наука, 1990
- 11) Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М:Наука, 1990
- 12) Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. (для вузов) М: Мир и образование, ОНИКС 21 век, 2002.