**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра физики и энергоэффективных технологий

А. П. ПАВЛЕНКО, Р. Г. ПИНЧУК, И. И. ПРОНЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Пособие

Гомель 2021

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики и энергоэффективных технологий

А. П. ПАВЛЕНКО, Р. Г. ПИНЧУК, И. И. ПРОНЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области транспорта и транспортной деятельности для обучающихся по специальностям 1-37 02 01 «Тяговый состав железнодорожного транспорта (по направлениям)», 1-37 02-02 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», 1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования», 1-37 02 05 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство» в качестве пособия по учебной дисциплине «Физика»

Гомель 2021

УДК 531/534(075.8)
ББК 22.33
П12

Р е ц е н з е н т ы: кафедра общей физики ГГУ им. Ф. Скорины (заведующий кафедрой – канд. техн. наук, доцент *Е. Б. Шершнев);*
профессор кафедры вагонов, д-р техн. наук *О. В. Холодилов* (БелГУТ)

Павленко, А. П.

П12 Электричество : пособие / А. П. Павленко, Р. Г. Пинчук, И. И. Проневич ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2021. – 91 с.
ISBN 978-985-891-047-1

Приведены основные сведения из теории, примеры решения задач, задачи для самостоятельного решения по разделу программы «Электричество и магнетизм» учебной дисциплины «Физика», основная и дополнительная литература, вопросы для самоконтроля, справочные таблицы и общие методические указания по разделу.

Предназначено для методического обеспечения как аудиторной (под руководством преподавателя), так и внеаудиторной (самостоятельной) работы студентов специальностей 1- 37 02 05 «Строительство железных дорог, путь и путевое хозяйство», 1-37 02 01 «Тяговый состав железнодорожного транспорта» (по направлениям), 1-37 02 02 «Подвижной состав железнодорожного транспорта», 1-37 02 03 «Техническая эксплуатация погрузочно-разгрузочных, путевых, дорожно-строительных машин и оборудования».

УДК 531/534(075.8)
ББК 22.33

ISBN 978-985-891-047-1

1 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

1.1 Основные законы и формулы

Закон Кулона (для однородной изотропной среды)

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

где F – величина силы взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2; ε_0 – электрическая постоянная, равная $8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м; ε – диэлектрическая проницаемость среды; r – расстояние между зарядами.

Закон сохранения электрического заряда

$$\sum_{i=1}^{n} q_i = \text{const},$$

где $\sum_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, входящих в электрически изолированную систему; n – число зарядов.

Напряженность электрического поля

$$\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q_0},$$

где $\bar{F}$ – сила, действующая на точечный положительный заряд q_0, помещенный в данную точку поля.

Объемная, поверхностная и линейная плотности заряда:

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

Поток вектора напряженности электрического поля определяется:

а) через произвольную поверхность, помещенную в неоднородное поле,

$$\Phi_E = \int_S E\cos\alpha dS\,,$$

где α – угол между вектором напряженности и нормалью к элементу поверхности; dS – площадь элемента поверхности;

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

$$\Phi_E = ES\cos\alpha\,;$$

в) через замкнутую поверхность S

$$\Phi_E = \oint_S E\cos\alpha dS,$$

где интегрирование ведется по всей поверхности.

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в вакууме: поток вектора напряженности сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов q_1, q_2, ..., q_n, деленной на ε_0:

$$\Phi_E = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{n} q_i = \frac{1}{\varepsilon_0}\int \rho dV\,,$$

где $\sum\limits_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, заключенных внутри замкнутой поверхности; n – число зарядов; ρ – объемная плотность зарядов; V – объем пространства, в котором находятся заряды.

Поток вектора напряженности поля – величина скалярная.

Величина напряженности поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от этого заряда,

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^2}\,.$$

Величина напряженности поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R и зарядом q на расстоянии r от центра сферы:

а) внутри сферы ($r < R$) $E = 0$;

б) на поверхности сферы ($r = R$)

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{R^2};$$

в) вне сферы ($r > R$)

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{r^2}.$$

Принцип суперпозиции (наложения) электростатических полей заключается в том, что напряженность $\overline{E}$ результирующего поля, создаваемого системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемой в данной точке каждым из зарядов в отдельности:

$$\overline{E} = \overline{E}_1 + \overline{E}_2 + \ldots + \overline{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \overline{E}_i .$$

В случае двух электростатических полей с напряженностями $\overline{E}_1$ и $\overline{E}_2$ модуль вектора напряженности определяется выражением

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

где α – угол между векторами $\overline{E}_1$ и $\overline{E}_2$.

Величина напряженности поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью, определяется по формуле

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Величина напряженности поля, создаваемого двумя параллельными бесконечными равномерно и разноименно заряженными плоскостями, с одинаковой по модулю поверхностной плотностью заряда (поле плоского конденсатора)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Величина напряженности поля, создаваемого бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или цилиндром) на расстоянии r от оси,

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{\tau}{r} \quad (r \geq R); \quad E = 0 \ (r < R).$$

Величина напряженности поля, создаваемого объемно заряженным сферическим шаром,

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{Q}{r^2} \ (r \geq R); \quad E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{Q}{R^3}r' \ (r' \leq R).$$

Циркуляция вектора напряженности электрического поля есть величина, численно равная работе по перемещению положительного единичного точечного заряда вдоль любого замкнутого контура. Циркуляция выражается интегралом. В случае электростатического поля она равна нулю и ее можно представить следующим образом:

$$\oint_L \bar{E}d\bar{l} = \oint_L E_l \, d\bar{l} = 0,$$

где E_l – проекция вектора напряженности в данной точке контура на направление касательной к контуру в той же точке.

1.2 Примеры решения задач

Пример 1.1 *Два точечных положительных заряда q_1 = 180 нКл и q_2 = 720 нКл помещены на расстоянии r = 60 см друг от друга. Где надо поместить третий заряд q_3 и каким он должен быть по модулю и знаку, чтобы все три заряда оказались в равновесии?*

Дано:

q_1 = 180 нКл = $0{,}18 \cdot 10^{-6}$ Кл,
q_2 = 720 нКл = $0{,}72 \cdot 10^{-6}$ Кл,
r = 60 см = 0,6 м.

x, q_3 – ?

Решение

Заряд q_3 должен быть отрицательным и находиться между зарядами q_1 и q_2 на прямой, их соединяющей. Только в этом случае силы F_{31} и F_{32}, с которыми действуют на заряд q_3 два одноименных заряда q_1 и q_2, будут располагаться на одной прямой и иметь противоположные направления, что необходимо для равновесия заряда q_3, в этом случае силы, действующие на каждый из зарядов, будут уравновешены (рисунок 1).

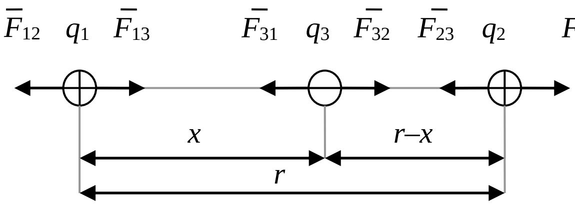


Рисунок 1

Предположим, что заряд q_3 находится в точке, на той же прямой, между зарядами q_1 и q_2. Тогда условие равновесия заряда q_3 запишется следующим образом:

$$\bar F_{31} + \bar F_{32} = 0. \tag{1}$$

Подставив в уравнение (1) вместо сил их значение, по закону Кулона получим

$$\frac{q_1 q_3}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon x^2} - \frac{q_2 q_3}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon (r-x)^2} = 0.$$

Отсюда следует равенство

$$\frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(r-x)^2}.$$

Решая уравнение (2) относительно x, найдем:

$$x_1 = \frac{r\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1}+\sqrt{q_2}} \;; \quad x_2 = \frac{r\sqrt{q_2}}{\sqrt{q_1}-\sqrt{q_2}}. \tag{2}$$

Исследуя второй корень, видим, что должно выполняться одно из двух неравенств: $x_2 > r$ (при $q_1 > q_2$) или $x_2 < 0$ (при $q_1 < q_2$). Этим неравенствам соответствует положение точки C вне отрезка AB, что невозможно для равновесия заряда q_3. Следовательно, имеем

$$x = \frac{r\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1}+\sqrt{q_2}}. \tag{3}$$

Проверяем, дает ли правая часть этого выражения длину в метрах:

$$\left[x\right] = \frac{\text{м} \cdot \text{Кл}^{1/2}}{\text{Кл}^{1/2}} = \text{м}.$$

Подставим в формулу (3) значения и проведем вычисления:

$$x = \frac{0,6 \cdot \sqrt{0,18 \cdot 10^{-6}}}{\sqrt{0,18 \cdot 10^{-6}} + \sqrt{0,72 \cdot 10^{-6}}} = 0,2.$$

Для нахождения величины заряда q_3 запишем условие равновесия одного из двух зарядов q_1 или q_2:

$$\overline{F}_{12} + \overline{F}_{13} = 0.$$

Подставим вместо сил их значения и по закону Кулона получим

$$\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2} - \frac{q_1 q_3}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 x^2} = 0\ . \tag{4}$$

Отсюда имеем

$$\frac{q_2}{r^2} = \frac{q_3}{x^2}.$$

Заменив величину x ее значением из формулы (3), получим

$$\frac{q_2}{r^2} = \frac{q_3\left(\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}\right)^2}{r^2 q_1}.$$

Отсюда следует

$$q_3 = \frac{q_1 q_2}{\left(\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}\right)^2}.$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[q_3] = \frac{\text{Кл}^2}{\text{Кл}} = \text{Кл}.$$

Подставляем значения и проводим вычисления:

$$q_3 = \frac{0{,}18\cdot10^{-6}\cdot0{,}72\cdot10^{-6}}{\left(\sqrt{0{,}18\cdot10^{-6}}+\sqrt{0{,}72\cdot10^{-6}}\right)^2} = -8\cdot10^{-8}\,\text{Кл} = -80\ \text{нКл}.$$

Ответ: x = 0,2 м; q_3 = –80 нКл.

Пример 1.2 *Три одинаковых положительных заряда, по 1 нКл каждый, расположены в вершине равностороннего треугольника. Какой отрицательный заряд надо поместить в центр треугольника, чтобы система находилась в равновесии?*

Дано:
$q_1 = q_2 = q_3 = 1$ нКл.
q_4 – ?

Решение

Все три заряда находятся в одинаковых условиях. Поэтому достаточно выяснить, при каких условиях будет находиться в равновесии один из трех зарядов, например заряд q_1 (рисунок 1).

Заряд будет находиться в равновесии, если сумма действующих на него сил равна нулю:

$$\bar{F}_{1,3} + \bar{F}_{1,2} + \bar{F}_{1,4} = \bar{F}_1 + \bar{F}_{1,4} = 0$$

или в скалярной форме: $F_1 - F_{1,4} = 0$. Выразив F_1 через $F_{1,2}$ и $F_{1,3}$ и учитывая, что $F_{1,2} = F_{1,3}$, получим $F_{1,4} = F_{1,2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)}$. (1)

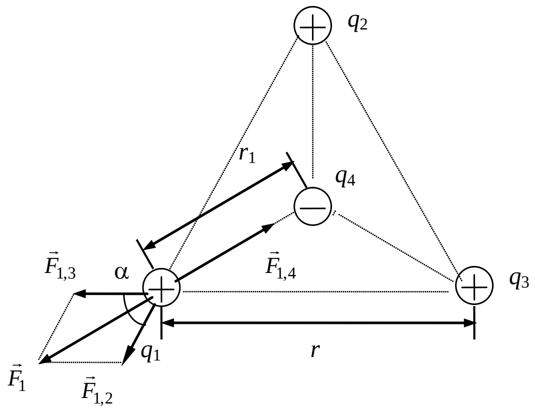


Рисунок 1

Применив закон Кулона и имея в виду, что $q_1 = q_2 = q_3$, перепишем формулу (1) в следующем виде:

$$k\frac{q_1 q_4}{\varepsilon r_1^2} = k\frac{q_1^2}{\varepsilon r^2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)},$$

откуда можно найти

$$q_4 = \frac{q_1 r_1^2}{\varepsilon r^2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)}. \qquad (2)$$

Из геометрических построений в равностороннем треугольнике следует

$$r_1 = \frac{r}{2\cos 30^\circ} = \frac{r}{\sqrt{3}}.$$

С учетом этого, подставив исходные данные в формулу (2), получаем, что $q_4 = 0{,}58$ нКл.

Проверку размерностей можно не проводить – она очевидна.

О т в е т: $q_4 = 0{,}58$ нКл.

Пример 1.3 *Тонкий прямой стержень длиной l = 15 см равномерно заряжен с линейной плотностью заряда τ = 0,1 мКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии a = 10 см от ближайшего конца находится точечный заряд q_0 = 10 нКл. Определить силу взаимодействия стержня и заряда.*

Д а н о:

l = 15 см = $15 \cdot 10^{-2}$ м,
τ = 0,1 мКл/м,
a = 10 см,
q_0 = 10 нКл.

F – ?

Р е ш е н и е

Силу взаимодействия зарядов непосредственно по закону Кулона определить нельзя, т. к. заряд, распределенный по стержню, нельзя считать точечным. Чтобы применить закон Кулона, рассмотрим бесконечно малый элемент длины dx стержня (рисунок 1), находящийся на расстоянии x от заряда q_0.

Заряд этого элемента $dq = dx$. По закону Кулона на заряд q_0 со стороны заряда dq будет действовать сила

$$dF = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 dq}{x^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 \tau dx}{x^2}. \tag{1}$$

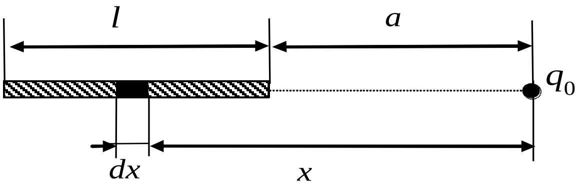


Рисунок 1

Со стороны всех остальных бесконечно малых элементов стержня на заряд q_0 также будут действовать элементарные силы, направленные в ту же сторону, что и dF. Сложив их модули (проинтегрировав формулу 1), найдем искомую силу, равную результирующей силе действия всех элементов стержня на заряд q_0:

$$F = \int dF = \int\limits_a^{a+l} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_0 \tau dx}{x^2}\ . \tag{2}$$

Вынеся постоянные множители за знак интеграла, получим

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q_0 \tau \int\limits_a^{a+l} \frac{dx}{x^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} q_0 \tau \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a+l}\right). \tag{3}$$

Выразим в единицах СИ величины, входящие в формулу: $l =$ 0,15 м, a = 0,1 м, $q_0 = 1\cdot10^{-8}$ Кл, $\tau = 1\cdot10^{-7}$ Кл/м. Подставим эти значения в формулу (3) и, выполнив вычисления, найдем силу взаимодействия стержня и заряда $F = 5\cdot10^{-5}$ Н.

Проверим размерность полученной формулы:

$$[F] = \frac{\text{Кл}\cdot\text{Кл}\cdot\text{м}}{\text{Ф}\cdot\text{м}\cdot\text{м}} = \frac{\text{Кл}\cdot\text{В}}{\text{м}} = \frac{\text{А}\cdot\text{В}\cdot\text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}} = \text{Н}.$$

Ответ: $F = 5\cdot10^{-5}$ Н.

Пример 1.4 *Электрическое поле создано в вакууме двумя точечными зарядами q_1 = 2,1 нКл и q_2 = –3,2 нКл. Расстояние между зарядами d = 0,22 м. Определить напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии r_1 = 0,15 м от первого заряда и r = 0,10 м – от второго.*

Дано:

q_1= 2,1нКл = $2{,}1 \cdot 10^{-9}$ Кл,
q_2= –3,2 нКл = $-3{,}2 \cdot 10^{-9}$ Кл,
d = 0,22 м,
r_1 = 0,15 м,
r_2 = 0,10 м.

E – ?

Решение

Согласно принципу суперпозиции электрических полей каждый заряд создает электрическое поле независимо от присутствия в пространстве других зарядов. Поэтому напряженность $\overline{E}$ результирующего электрического поля в искомой точке может быть найдена как геометрическая сумма напряженностей $\overline{E}_1$ и $\overline{E}_2$ и полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности. Модуль результирующего вектора напряженности электрического поля $\bar{E}$ найдем по теореме косинусов (рисунок 1):

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha}, \qquad (1)$$

где $E_1 = \dfrac{q_1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1^2}$ – напряженность поля, создаваемого зарядом q_1;

$E_2 = \dfrac{q_2}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2^2}$ – напряженность поля, создаваемого зарядом q_2;

α – угол между векторами $\overline{E}_1$ и $\overline{E}_2$.

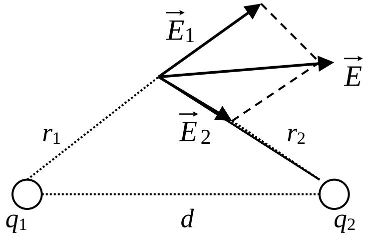


Рисунок 1

Используя известные соотношения для треугольника со сторонами d, r_1, r_2, найдем

$$\cos\alpha = \frac{d^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1 r_2}. \qquad (2)$$

Подставим выражения для E_1 и E_2 в уравнение (1):

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\sqrt{\frac{q_1^2}{r_1^4} + \frac{q_2^2}{r_2^4} + 2\frac{q_1 q_2}{r_1^2 r_2^2}\cos\alpha}. \qquad (3)$$

Вычислим значение $\cos\alpha$ по формуле (2):

$$\cos\alpha = \frac{0{,}22^2 - 0{,}15^2 - 0{,}10^2}{2\cdot 0{,}15\cdot 0{,}10} = 0{,}53.$$

Подставим в формулу (3) исходные значения и проведем вычисления, учитывая, что для вакуума $\varepsilon = 1$:

$$E = \frac{1}{4\cdot 3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}}\sqrt{\frac{\left(2{,}1\cdot 10^{-9}\right)^2}{0{,}15^4} + \frac{\left(3{,}2\cdot 10^{-9}\right)^2}{0{,}1^4} + 2\frac{2{,}1\cdot 3{,}2\cdot 10^{-18}\cdot 0{,}53}{0{,}15^2\cdot 0{,}1^2}} =$$
$$= 3{,}4\cdot 10^3\,\text{В/м}.$$

О т в е т: $E = 3{,}4\cdot 10^3$ В/м.

Пример 1.5 *Точечный заряд q = 25 нКл находится в поле, созданном прямым бесконечным цилиндром радиуса $R = 10^{-2}$ м, равномерно заряженным с поверхностной плотностью σ = 0,2 нКл/см^2. Определить силу, действующую на точечный заряд, если его расстояние от оси цилиндра r = 10 см.*

Д а н о:	Р е ш е н и е
q = 25 нКл = $25\cdot 10^{-9}$ Кл, $R = 10^{-2}$ м, σ = 0,2 нКл/см^2 = $2\cdot 10^{-6}$ Кл/м^2, r = 10 см = 0,1 м. F – ?	Значение силы F, действующей на точечный заряд q, находящийся в поле, определяется по формуле $$\overline{F} = q\overline{E}, \qquad (1)$$ где E – напряженность поля.

Напряженность поля бесконечно длинного равномерно заряженного цилиндра определяется по формуле

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 r}, \qquad (2)$$

где τ – линейная плотность заряда.

Найдем линейную плотность заряда τ через поверхностную плотность σ. Для этого выделим элемент цилиндра длиной l и выразим находящийся на нем заряд q двумя способами:

$$q = \sigma s = \sigma 2\pi r l \quad \text{и} \quad q = \tau l.$$

Приравняем правые части этих выражений:

$$\tau l = \sigma 2\pi r l.$$

Отсюда следует

$$\tau = 2\pi R\sigma. \qquad (3)$$

Подставим выражения (3) и (2) в формулу (1) и получим

$$F = \frac{q\sigma R}{\varepsilon_0 r}. \qquad (4)$$

Проверим, дает ли правая часть выражения (4) силу в Ньютонах:

$$[F] = \frac{\text{Кл}\cdot\text{Кл}/\text{м}^2\cdot\text{м}}{\text{Ф}/\text{м}\cdot\text{м}} = \frac{\text{В}\cdot\text{Кл}}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}} = \text{Н}.$$

Подставляем значения и проводим вычисления:

$$F = \frac{25\cdot10^{-9}\cdot2\cdot10^{-6}\cdot10^{-2}}{8{,}85\cdot10^{-12}\cdot0{,}1} = 5{,}65\cdot10^{-4}\,\text{Н} = 565\ \text{мкН}.$$

О т в е т: F = 565 мкН.

1.3 Задачи

1.1 Чтобы представить себе величину заряда q = 1 Кл, подсчитайте, с какой силой F отталкивались бы два одноименных заряда величиной q = 1 Кл, находясь на расстоянии L = 1 км друг от друга.

1.2 Найти силу притяжения F между ядром атома водорода и электроном. Радиус атома водорода $r = 0{,}5\cdot10^{-10}$ м, электрический заряд ядра равен по модулю и противоположен по знаку заряду электрона $e = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл.

1.3 Вычислить ускорение a, сообщаемое одним электроном другому, находящемуся от первого на расстоянии r = 1 мм.

1.4 Два точечных заряда q_1 = 8 нКл и q_2 = 15 нКл взаимодействуют в трансформаторном масле с силой F = 0,1 мН. Определить расстояние между зарядами.

1.5 Два точечных заряда, находящихся друг от друга на расстоянии r = 50 см, взаимодействуют между собой в воздухе с некоторой силой F. Определить, на каком расстоянии l эти заряды следует поместить в керосине, чтобы сила их взаимодействия осталась той же.

1.6 Во сколько раз сила гравитационного притяжения между двумя протонами меньше силы их кулоновского отталкивания? Заряд протона численно равен заряду электрона.

1.7 Определить, во сколько раз сила кулоновского отталкивания $F_к$ между двумя электронами больше силы их гравитационного притяжения $F_{гр}$.

1.8 Определить силу электростатического отталкивания $F_к$ между ядром атома лития и бомбардирующим его протоном, предполагая, что протон приблизился к ядру атома лития на расстояние $r = 2\cdot10^{-14}$м. Заряд ядра атома лития в три раза больше заряда протона, влиянием электронной оболочки атома лития пренебречь.

1.9 Два одинаковых точечных заряда q, находящихся на расстоянии 1 м друг от друга, взаимодействуют в вакууме с силой F = 0,2 Н. Определить величину зарядов.

1.10 Определить, в какой среде находятся два точечных электрических заряда $q_1 = q_2$ = 25 нКл, если они взаимодействуют с силой F = 7 мкН, а расстояние между ними r = 10 см.

1.11 Определить, с какой силой F действуют два равных заряда на третий, помещенный на середине расстояния между ними. Рассмотреть случаи одноименных и разноименных зарядов.

1.12 Два шарика массой m = 1 г каждый подвешены на нитях, верхние концы которых соединены вместе. Длина нити l = 10 см. Какие одинаковые заряды q надо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол $\varphi = 60°$?

1.13 Два точечных заряда $q_1 = q_2$ = 1 мкКл находятся на расстоянии r_{12} = 10 см. Определить силу, действующую на точечный заряд q_3 = 0,1 мкКл, удаленный на r_1 = 6 см от первого и r_2 = 8 см от второго зарядов.

1.14 Шарик массой $m = 4$ г, несущий заряд $q_1 = 27{,}8 \cdot 10^{-8}$ Кл, подвешен в воздухе на тонкой шелковой нити. При приближении к нему заряда q_2 противоположного знака на расстояние $r = 6$ см нить отклонилась на угол $\alpha = 45°$ от вертикального направления. Найти величину этого заряда.

1.15 Сила $F_н$ взаимного гравитационного притяжения двух водяных, одинаково заряженных капель уравновешивается силой электростатического отталкивания $F_к$. Определить заряд капель q, если их радиусы $r = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ м.

1.16 Тонкая шелковая нить выдерживает максимальную силу натяжения $T = 15$ мН. На этой нити подвешен шарик массой $m = 0{,}8$ г, имеющий положительный заряд $q_1 = 12$ нКл. Снизу, в направлении линии подвеса, к нему подносится шарик, имеющий отрицательный заряд $q_2 = -14$ нКл. Определить, при каком расстоянии r между шариками произойдет разрыв.

1.17 Найти силу, действующую на заряд $q = 2$ мКл, если заряд помещен: 1) на расстоянии $r = 2$ см от заряженной нити с линейной плотностью заряда $\tau = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл/см; 2) в поле заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл/см^2; 3) на расстоянии $r = 2$ см от поверхности заряженного шара радиусом $R = 2$ см и поверхностной плотностью заряда $\sigma = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл/см^2. Диэлектрическая среда – фарфор.

1.18 Две круглые одинаковые пластины площадью $S = 400$ см^2 каждая расположены параллельно друг другу. Заряд одной пластины $q_1 = 400$ нКл, другой – $q_2 = -200$ нКл. Определить силу взаимного притяжения пластин F, если расстояние между ними $r = 3$ мм.

1.19 С какой силой на единицу длины F_l отталкиваются две одноименно заряженные бесконечно длинные нити с одинаковой линейной плотностью заряда $\tau = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл/см, находящиеся на расстоянии $r = 2$ см друг от друга? Какую работу на единицу длины A_l надо совершить, чтобы сдвинуть эти нити на расстояние $r = 1$ см?

1.20 Два точечных заряда находятся на расстоянии r_1 друг от друга. При уменьшении расстояния между зарядами на $\Delta r = 0{,}6$ м сила взаимодействия увеличивается в два раза. Определить расстояние r_1.

1.21 На двух одинаковых капельках воды находится по одному лишнему электрону. Каков радиус капелек r, если сила электростатического отталкивания уравновешивает силу гравитационного притяжения?

1.22 С какой силой на единицу площади F_s отталкиваются две одноименно заряженные бесконечно протяженные плоскости с одинаковой плотностью заряда $\sigma = 3 \cdot 10^{-8}$ Кл/см^2?

1.23 К бесконечной равномерно заряженной вертикальной плоскости подвешен на нити одноименно заряженный шарик массой $m = 50$ мг и зарядом $q = 0,6$ нКл. Сила натяжения нити, на которой висит шарик, $F = 0,7$ мН. Найти поверхностную плотность заряда σ на плоскости.

1.24 Тонкая нить несет равномерно распределенный по длине заряд ($\tau = 2$ мкКл/м). Вблизи средней части нити на расстоянии $r = 1$ см, малом по сравнению с ее длиной, находится точечный заряд $q = 0,1$ мкКл. Определить силу, действующую на заряд.

1.25 Большая металлическая пластина несет равномерно распределенный по поверхности электрический заряд ($\sigma = 10$ нКл/м^2). На малом расстоянии от этой пластины находится точечный заряд $q = 100$ нКл. Найти силу F, действующую на заряд.

1.26 Заряды $q_1 = q$ и $q_2 = -2q$ находятся на расстоянии l друг от друга. С какой силой F действуют эти заряды на третий заряд $q_3 = 3q$, если он расположен на расстоянии l от середины линии, соединяющей эти заряды?

1.27 Точечный заряд $q = 20$ нКл находится в вакууме на расстоянии $a = 50$ мм от заземленной плоской металлической стенки. Найти силу F, с которой стенка притягивает к себе заряд.

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

1.29 Два одинаковых проводящих шарика с зарядами $+q_1$ и $-q_2$ вследствие притяжения соприкоснулись и вновь разошлись на расстояние r. Определить заряд каждого шарика после соприкосновения и силу взаимодействия между ними.

1.30 Два шарика, радиусы и вес которых равны, подвешены так, что их поверхности соприкасаются. После сообщения шарикам заряда q они оттолкнулись и разошлись на угол 2α. Найти вес шариков, если расстояние от точки подвеса до центра шарика равно l и размер шарика мал по сравнению с отклонением от положения равновесия.

1.31 Имеются два положительных заряда $q_1 = ne$ и $q_2 = me$. Расстояние между этими зарядами равно l. Как нужно расположить третий заряд q, чтобы он находился в равновесии, если заряды q_1 и q_2: 1) закреплены; 2) свободны? Чему в этом случае равен заряд q?

1.32 Два одинаковых металлических шарика радиусом r и плотностью ρ надеты на тонкий непроводящий стержень. Верхний шарик закреплен на стержне, нижний может свободно перемещаться вдоль стержня. Шарики опущены в жидкость, диэлектрическая проницаемость которой – ε, плотность – ρ_1. У каждого миллиардного атома верхнего шарика забрали по одному электрону и перенесли на подвижный шарик. На каком расстоянии будет находиться нижний шарик от верхнего в состоянии равновесия, если стержень расположен вертикально?

1.33 В вершинах квадрата помещены положительные точечные заряды q = 1 мКл каждый. Какой заряд q' нужно поместить в центре квадрата, чтобы вся система оказалась в равновесии?

1.34 Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в глицерин. Какова должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей не изменился?

1.35 На двух одинаковых закрепленных в одной точке нитях висят два заряженных шарика. Заряды и массы шариков таковы, что при равновесии они расположены на расстоянии l_1 друг от друга. Определить расстояние l_2 между шариками после того, как один из них разрядили.

1.36 Тонкий прямой стержень длиной l = 15 см равномерно заряжен с линейной плотностью τ = 0,1 мКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии a = 10 см от ближайшего конца находится точечный заряд q_0 = 10 нКл. Определить силу взаимодействия F стержня и заряда q_0.

1.37 Найти напряженность E электрического поля в точке, лежащей посередине между точечными зарядами $q_1 = 8\cdot10^{-9}$ Кл и $q_2 = 6\cdot10^{-9}$ Кл, находящихся в вакууме на расстоянии r = 0,1 м.

1.38 Большая металлическая пластина несет равномерно распределенный по поверхности заряд с поверхностной плотностью σ = 10 мКл/м^2. На некотором расстоянии от пластины находится точечный заряд q = 150 нКл. Определить силу F , действующую на заряд.

1.39 В плоском конденсаторе заряженная капелька ртути находится в равновесии при напряженности поля E = 600 В/см. Определить массу капли m, если ее заряд $q = 2\cdot10^{-7}$ Кл.

1.40 Определить напряженность E электрического поля на расстоянии $l = 2 \cdot 10^{-10}$ м от одновалентного иона. Заряд иона считать точечным.

1.41 Определить на каком расстоянии r от точечного заряда q = 0,2 нКл, находящегося в трансформаторном масле, напряженность электрического поля E = 5 В/м.

1.42 В центре проводящей сферы находится точечный заряд q = 15 нКл. Определить напряженность электрического поля на поверхности сферы, если ее радиус r = 25 см.

1.43 Определить напряженность E электрического поля, создаваемого находящимся в трансформаторном масле точечным зарядом q = 10 нКл на расстоянии r = 10 см от него.

1.44 На металлической сфере радиусом R = 15 см находится заряд q = 5 нКл. Определить напряженность E электрического поля на поверхности сферы.

1.45 Сплошной эбонитовый шар радиусом R = 10 см имеет равномерно распределенный заряд с объемной плотностью ρ = 25 нКл/м^3. Определить смещение D электрического поля на поверхности шара.

1.46 Длинная тонкая прямая проволока имеет заряд, равномерно распределенный по всей ее длине. Определить линейную плотность заряда τ, если на расстоянии r = 0,2 м от проволоки, против ее середины, напряженность поля E = 500 В/м.

1.47 Заряд $q = 4 \cdot 10^{-7}$ Кл равномерно распределен по объему фарфорового шара диаметром d = 3 см. Найти напряженность электрического поля E, смещение электрического поля D на расстоянии r_1 = = 2 см и r_2 = 4 см от центра шара. Построить график зависимости напряженности поля от расстояния до центра шара.

1.48 Плоская квадратная пластина со стороной a = 10 м находится на некотором расстоянии от бесконечной, равномерно заряженной (σ = 1 мкКл/м^2) плоскости. Плоскость пластины составляет с линиями поля угол $\alpha = 30°$. Найти поток N_D вектора смещения электрического поля через эту пластину.

1.49 Расстояние между двумя длинными тонкими проволоками, расположенными параллельно друг другу, d = 16 см. Проволоки равномерно заряжены разноименными зарядами с линейной плотностью τ = 150 нКл/м. Какова напряженность электрического поля в точке, удаленной на расстояние a = 10 см как от первой, так и от второй проволоки?

1.50 Вычислить напряженность E электрического поля внутри и вне проводящей сферы радиусом R, на поверхности которой распределен заряд q.

1.51 Заряд $q = 5 \cdot 10^{-10}$ Кл равномерно распределен на поверхности металлического шарика радиусом $R = 2{,}5 \cdot 10^{-2}$ м. Найти напряженность электрического поля E: 1) в центре шарика; 2) на его поверхности; 3) на расстоянии $r = 5 \cdot 10^{-2}$ м от центра шарика.

1.52 В трех вершинах квадрата со стороной $a = 0{,}4$ м находятся положительные одинаковые заряды по $5 \cdot 10^{-9}$ Кл каждый. Найти напряженность поля E в четвертой вершине.

1.53 Медный шар диаметром $d = 1$ см помещен в трансформаторное масло. Чему равен заряд шара, если в однородном электростатическом поле шар оказался в масле во взвешенном состоянии? Поле направлено вверх и его напряженность $E = 36$ кВ/см.

1.54 Смещение электрического поля в конденсаторе $D = 10^{-9}$ Кл/м^2. Чему равны поверхностная плотность σ заряда на пластинах этого конденсатора и напряженность E электрического поля?

1.55 Электростатическое поле создается двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими одинаковый, равномерно распределенный по площади заряд ($\sigma = 1$ нКл/м^2). Определить напряженность поля E: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам.

1.56 Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, несущими равномерно распределенный по площади заряд с поверхностными плотностями $\sigma_1 = 1$ нКл/м^2 и $\sigma_2 =$ $= 3$ нКл/м^2. Определить напряженность поля E: 1) между пластинами; 2) вне пластин. Построить график изменения напряженности вдоль линии, перпендикулярной пластинам.

1.57 Две длинные прямые параллельные нити находятся на расстоянии $d = 5$ см друг от друга. На нитях равномерно распределены электрические заряды с линейными плотностями заряда $\tau_1 = -5$ нКл/см и $\tau_2 = 10$ нКл/см. Определить напряженность E электрического поля в точке, удаленной от первой нити на расстояние $r_1 = 3$ см, а от второй – $r_2 = 4$ см.

1.58 Две прямоугольные одинаковые параллельные пластины со сторонами $a = 10$ см и $b = 15$ см расположены на малом (по сравнению с линейными размерами пластин) расстоянии друг от друга. На одной из пластин равномерно распределен заряд q_1 = 50 нКл, на другой – q_2 = 150 нКл. Определить напряженность электрического поля E между пластинами.

1.59 Протон, летящий по направлению к ядру гелия, в некоторой точке электрического поля напряженностью E = 10 кВ/м имеет скорость υ = 1 мм/с. На какое расстояние протон сможет приблизиться к ядру?

1.60 Большая плоская пластина толщиной d = 1 см несет заряд, равномерно распределенный по объему. Объемная плотность заряда ρ = 100 нКл/м^3. Найти напряженность E электрического поля вблизи центральной части пластины.

1.61 Полусфера несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ = 1 нКл/м^2. Найти напряженность E электрического поля в геометрическом центре полусферы.

1.62 Металлическая сфера радиусом R = 20 см несет равномерно распределенный заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 10^{-9}$ Кл/м^2. Определить напряженность электрического поля в точках на расстоянии r_1 = 16 см и r_2 = 26 см от центра сферы. Построить графики зависимости $E = E(r)$.

1.63 Две концентрические металлические заряженные сферы радиусами R_1 и R_2 ($R_1 < R_2$) несут на себе заряды q_1 и $-q_2$. Найти напряженности электрического поля в точках, отстоящих от центра сфер на расстоянии: 1) $r_1 < R_1$; 2) $R_1 < r_2 < R_2$; 3) $r_3 > R_2$. Построить графики зависимости $E = E(r)$.

1.64 В однородное электрическое поле с напряженностью E внесли металлическую пластинку площадью S. Какой заряд q индуцируется на каждой ее стороне?

1.65 В вершинах равностороннего треугольника со сторонами a = 10 см расположены заряды q = 10 нКл каждый. Определить напряженность E электрического поля в центре треугольника и в точке, лежащей на середине одной из сторон.

1.66 В двух противоположных вершинах квадрата со стороной a = 0,3 м находятся заряды q = 0,2 мкКл каждый. Определить напряженность E электрического поля в двух других вершинах квадрата.

1.67 Свободные заряды равномерно распределены с объемной плотностью ρ = 5 нКл/м^3 по фарфоровому шару радиусом R = 10 см. Определить напряженность электростатического поля на расстояниях r_1 = 5 см и r_2 = 15 см от центра шара.

1.68 Тонкий стержень длиной l = 2 см заряжен с линейной плотностью заряда τ = 50 нКл/м. Найти напряженность E электрического поля в точке, находящейся на расстоянии r = 5 см от стержня напротив его середины.

1.69 Тонкое кольцо радиусом R = 8 см несет заряд, равномерно распределенный с линейной плотностью τ = 10 нКл/м. Какова напряженность E электрического поля в точке, равноудаленной от всех точек кольца на расстояние r = 10 см?

1.70 Электрическое поле создано двумя точечными зарядами q_1 = 10 нКл и q_2 = –20 нКл, находящимися на расстоянии r = 20 см. Определить напряженность электрического поля E в точке, отстоящей от первого заряда на расстоянии r_1 = 40 см и r_2 = 50 см от второго.

1.71 Шарик массой m = 2 г и зарядом q = 40 мкКл подвешен на нити длиной l = 0,5 м и помещен в однородное электрическое поле, вектор напряженности E которого образует угол α = 30° с вертикалью. Определить силу натяжения нити и угол β, который образует нить с вертикалью, если напряженность поля E = 200 кВ/м.

2 ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

2.1 Основные законы и формулы

Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению потенциальной энергии положительного точечного заряда, помещенного в данную точку поля, к величине этого заряда или отношению работы силы по перемещению положительного точечного заряда из данной точки в бесконечность к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0} = \frac{A_\infty}{q_0}.$$

В бесконечности потенциал электрического поля условно принимается равным нулю.

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

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

Потенциал электрического поля, создаваемого равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R и зарядом q на расстоянии r от центра сферы:

а) внутри сферы ($r < R$)

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{R};$$

б) на поверхности сферы ($r = R$)

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{q}{R};$$

в) вне сферы ($r > R$)

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

Во всех приведенных формулах для потенциала сферы ε есть диэлектрическая проницаемость однородного диэлектрика, окружающего сферу.

Потенциал электрического поля, созданного системой зарядов, в данной точке согласно принципу суперпозиции равен алгебраической сумме потенциалов, создаваемых отдельными зарядами q_1, q_2, ..., q_n:

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

Энергия взаимодействия системы точечных зарядов

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

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

Связь между напряженностью и потенциалом электростатического поля определяется выражением

$$\overline{E} = -\operatorname{grad}\varphi = -\nabla\varphi.$$

В случае электрического поля, обладающего центральной или сферической симметрией, эта связь в скалярной форме определяется выражением

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

Для однородного поля, т. е. поля, напряженность которого в каждой его точке одинакова по модулю и направлению, справедливо выражение

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

где φ_1 и φ_2 – потенциалы точек двух эквипотенциальных поверхностей; d – расстояние между этими поверхностями вдоль силовой линии.

Работа, совершаемая силами электрического поля при перемещении точечного заряда q из точки 1 в точку 2, определяется выражением

$$A = q\left(\varphi_1 - \varphi_2\right) \text{ или } A = q\int_1^2 E_l \,\mathrm{d}l,$$

где E_l – проекция вектора напряженности на направление перемещения; $\mathrm{d}l$ – перемещение.

В случае однородного поля формула для работы имеет вид

$$A = qEl\cos\alpha,$$

где l – перемещение; α – угол между направлениями векторов напряженности и перемещения.

2.2 Примеры решения задач

Пример 2.1 *Определить ускоряющую разность потенциалов, которую должен пройти в электрическом поле электрон, чтобы его скорость возросла с v_1 = 1 Мм/с до v_2 = 5 Мм/с.*

Дано:
v_1 = 1 Мм/с,
v_2 = 5 Мм/с
U – ?

Решение

Работа, совершаемая силами электрического поля при перемещении электрона из точки 1 в точку 2,

$$A = e(\varphi_1 - \varphi_2),$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы электростатического поля, соответственно, в точках 1 и 2.

По теореме об изменении кинетической энергии, последняя равна работе действующей на тело (в данном случае, на электрон) силы (в данном случае, со стороны электрического поля):

$$A = T_2 - T_1 = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2} \ .$$

Приравняв оба выражения, получим ускоряющую разность потенциалов:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{m(\upsilon_2^2 - \upsilon_1^2)}{2e} \ .$$

Произведем проверку единиц:

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

Подставим в формулу значения величин и произведем вычисления:

$$U = \frac{9{,}11\cdot10^{31}\cdot\left(5^2 - 1^2\right)\cdot10^{12}}{2\cdot1{,}6\cdot10^{-19}} = 68{,}3\,\text{В}$$

О т в е т: $\varphi_1 - \varphi_2 = 68{,}3$ В

Пример 2.2 *Электростатическое поле создается бесконечно длинным цилиндром радиусом R = 7 мм, равномерно заряженным с линейной плотностью τ = 15 нКл/м. Определить: 1) напряженность поля E в точках, лежащих от оси цилиндра на расстояниях r_1 = 5 мм и r_2 = 1 см; 2) разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстоянии r_3 = 1 см и r_4 = 2 см от поверхности цилиндра, в средней его части.*

Д а н о:

R = 7 мм = $7\cdot10^{-3}$ м,
τ = 15 нКл/м = $15\cdot10^{-9}$ Кл/м,
r_1 = 5 мм = $5\cdot10^{-3}$ м,
r_2 = r_3 = 1 см = 10^{-2} м,
r_4 = 2 см = $2\cdot10^{-2}$ м.

E_{r1}, E_{r2}, φ_3, φ_4 – ?

Р е ш е н и е

Воспользуемся теоремой Гаусса:

$$\oint_S EdS = \oint_S E_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_i Q_i \ ,$$

взяв в качестве замкнутой поверхности коаксиальный с заряженным цилиндром цилиндр радиусом r и высотой l (рисунок 1). Если $r < R$, то замкнутая поверхность зарядов внутри не содержит, поэтому в этой области $E = 0$.

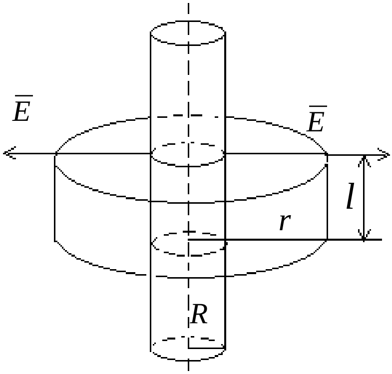


Рисунок 1

Поток вектора $\overline{E}$ сквозь торцы коаксиального цилиндра равен нулю (торцы параллельны линиям напряженности), а сквозь боковую поверхность – $2\pi rlE$. По теореме Гаусса при $r_2 > R$ имеем $2\pi r_2 lE = = \tau l/\varepsilon_0$, откуда

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{\tau}{r_2}. \tag{1}$$

Так как $\overline{E} = -\,\mathrm{grad}\varphi$, то полученная формула для поля с осевой симметрией запишется в виде

$$E = -\frac{d\varphi}{dr} \quad \text{или } d\varphi = -Edr.$$

Подставив сюда выражение для напряженности поля, создаваемого бесконечно длинным цилиндром

$$E = \tau/(2\pi\,\varepsilon_0 r),$$

получим

$$d\varphi = -\frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\frac{dr}{r}.$$

Проинтегрировав это выражение, найдем искомую разность потенциалов:

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_4 = \int\limits_{r_3+R}^{r_4+R} \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\frac{dr}{r} = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{r_4+R}{r_3+R}. \qquad (2)$$

Подставив в формулы (1) и (2) исходные значения, определим значение: $E_{r1} = 0$; $E_{r2} = 27$ кВ/м; $\Delta\varphi = 125$ В.

Ответ: $E_{r1} = 0$; $E_{r2} = 27$ кВ/м; $\Delta\varphi = 125$ В.

Пример 2.3 *Определить начальную скорость υ_0 сближения двух протонов, находящихся на очень большом расстоянии друг от друга, если минимальное расстояние r_{min}, на которое они могут сблизиться, равно 10^{-11} см.*

Дано:	Решение
$r_{min} = 10^{-11}$ см, $m = 1{,}67\cdot10^{-27}$ кг, $q = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл. υ_0 – ?	Система тел, состоящая из двух протонов, является замкнутой, поэтому ее центр масс все время движется с постоянной скоростью относительно лабораторной системы отсчета.

Удобно выбрать систему отсчета, связанную с центром масс, т. к. она, в силу вышесказанного, все время будет являться инерциальной. В этой системе отсчета протоны всегда будут иметь одинаковые по модулю скорости (направленные навстречу друг другу). В начальном состоянии (когда частицы находятся на достаточно большом расстоянии друг от друга) модули скорости υ_1 каждой частицы равны половине искомой скорости, т. е. $\upsilon_1 = \upsilon_0/2$.

Применим закон сохранения энергии, согласно которому полная механическая энергия изолированной системы постоянна:

$$E = T + \Pi,$$

где T – сумма кинетических энергий протонов; Π – потенциальная энергия взаимодействия зарядов.

В начальном состоянии протоны находились на достаточно большом расстоянии друг от друга, поэтому их начальной потенциальной энергией можно пренебречь ($\Pi_1 = 0$).

Полная энергия в этот момент времени будет равна кинетической энергии протонов:

$$E = T_1. \tag{1}$$

В конечном состоянии, когда протоны максимально сблизятся, их скорости и кинетические энергии будут равны нулю (в используемой системе отсчета), а полная энергия будет равна потенциальной энергии взаимодействия протонов:

$$E = П_2. \tag{2}$$

Приравняв правые части равенств (1) и (2), получим

$$T_1 = П_2. \tag{3}$$

Кинетическая энергия равна сумме кинетических энергий протонов:

$$T_1 = \frac{m\upsilon_1^2}{2} + \frac{m\upsilon_2^2}{2} = m\upsilon_1^2 = \frac{m\upsilon_0^2}{4} \ . \tag{4}$$

Потенциальная энергия системы двух точечных зарядов, находящихся в вакууме, определяется по формуле

$$П_2 = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_{\min}} \ . \tag{5}$$

С учетом равенств (4) и (5) формула (3) примет вид

$$\frac{m\upsilon_0^2}{4} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_{\min}}, \text{ откуда } \upsilon_0 = \frac{e}{\sqrt{\pi\varepsilon_0 m r_{\min}}} \ .$$

Произведем проверку единиц:

$$[\upsilon_0] = \frac{\text{Кл}}{\sqrt{\frac{\text{Ф}}{\text{м}}\text{кг}\cdot\text{м}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл}^2\cdot\text{В}}{\text{кг}\cdot\text{Кл}}} = \sqrt{\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}} = \sqrt{\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{кг}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}\frac{\text{м}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выполним вычисления по полученной формуле:

$$\upsilon_0 = \frac{1{,}6\cdot 10^{-19}}{\sqrt{3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot 1{,}67\cdot 10^{-27}\cdot 10^{-13}}} = 2{,}35\cdot 10^{6}\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

О т в е т: υ_0 = 2,35 Мм/с.

Пример 2.4 *Положительные заряды q_1=3 мкКл и q_2 = 20 нКл находятся в вакууме на расстоянии 1,5 м друг от друга. Определить работу, которую надо совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния 1 м.*

Д а н о:
q_1 = 3 мкКл,
q_2 = 20 нКл,
ε = 1,
l_1 = 1,5 м,
l_2 = 1 м.
A' – ?

Р е ш е н и е

Можно положить, что первый заряд q_1 остается неподвижным, а второй q_2 под действием внешних сил перемещается в поле, созданном зарядом q_1, приближаясь к нему с расстояния r_1 = 1,5 м до r_2 = 1 м.

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

$$A' = -A.$$

Это следует из теоремы об изменении кинетической энергии тела: если кинетическая энергия не изменяется (предполагаем это), то полная работа всех сил равна нулю ($A' + A = 0$).

Работа A сил электрического поля по перемещению заряда выражается формулой

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

Тогда работа A' внешних сил может быть записана в таком виде:

$$A' = q(\varphi_2 - \varphi_1). \qquad (1)$$

Потенциал начальной точки выражается формулой

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1}.$$

Потенциал начальной точки

$$\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_2}.$$

Подставляя эти выражения в формулу (1) и учитывая, что для данного случая переносимый заряд $q = q_2$, получим:

$$A' = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right).$$

Произведем проверку единиц:

$$\left[A'\right] = \frac{\text{м}}{\text{Ф}}\frac{\text{Кл}^2}{\text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{Кл}}\text{Кл}^2 = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}\text{Кл} = \text{Дж}.$$

Выполним вычисления по полученной формуле:

$$A' = \frac{3\cdot 10^{-6}\cdot 2\cdot 10^{-8}}{4\cdot 3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}}\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{1{,}5}\right) = 1{,}8\cdot 10^{-4}\,\text{Дж}.$$

О т в е т: $A' = 1{,}8\cdot 10^{-4}$ Дж.

Пример 2.5 *Шарик массой m = 1 г с зарядом $q = 5\cdot 10^{-8}$ Кл переместился из точки А, потенциал которой φ_A = 600 В, в точку В, потенциал которой φ_B = 0. Чему была равна его скорость в точке А, если в точке В она стала равной 0,4 м/с?*

Д а н о:
$m = 1$ г $= 10^{-3}$ кг,
$q = 5\cdot 10^{-8}$ Кл,
φ_A = 600 В,
φ_B = 0 В,
υ_B = 0,4 м/с.
υ_A – ?

Р е ш е н и е

Работа сил электрического поля равна изменению кинетической энергии шарика:

$$A = \Delta E_k$$

или

$$q(\varphi_A - \varphi_B) = \frac{m\upsilon_2^2}{2} - \frac{m\upsilon_1^2}{2}.$$

Отсюда следует

$$\upsilon_1 = \sqrt{\upsilon_2^2 - \frac{2q(\varphi_A - \varphi_B)}{m}}.$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[\upsilon_1] = \frac{\text{м}}{\text{с}} - \frac{\text{Кл}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{В}^{\frac{1}{2}}}{\text{кг}^{\frac{1}{2}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}} - \frac{\text{кг}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{м}}{\text{кг}^{\frac{1}{2}} \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставим в полученную формулу исходные значения и проведем вычисления:

$$\upsilon_1 = \sqrt{0,4^2 - \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-8} \cdot 600}{10^{-3}}} = 0,32 \text{ м/с}.$$

О т в е т: $\upsilon_1 = 0,32$ м/с.

2.3 Задачи

2.1 Определить, до какого потенциала φ можно зарядить находящийся в воздухе металлический шар радиусом R = 5 см, если напряженность электрического поля, при которой происходит пробой в воздухе, E = 3 МВ/м.

2.2 Материальная точка, имеющая заряд q = 0,5 нКл, двигаясь в ускоряющем электрическом поле, приобретает кинетическую энергию T_2 = 10 МэВ. Найти разность потенциалов Δφ между начальной и конечной точками траектории частицы в поле, если ее начальная кинетическая энергия T_1 = 0.

2.3 Грозовая туча имеет большой отрицательный заряд. Вследствие этого между ней и поверхностью земли существует сильное электрическое поле. Каково направление этого поля? Чему равна разность потенциалов Δφ между тучей, на высоте h = 0,8 км, и землей, если средняя напряженность электрического поля между ними E = 100 В/см?

2.4 При радиоактивном распаде из ядра атома полония вылетела α-частица, имеющая скорость $\upsilon = 1,6 \cdot 10^7$ м/с. Определить, какую разность потенциалов Δφ необходимо приложить, чтобы сообщить α-частице такую же скорость.

2.5 Точечный заряд q = 15 нКл, находясь в некоторой точке поля, обладает потенциальной энергией W = 15 мкДж. Определить потенциал φ в этой точке поля.

2.6 При перемещении заряда q = 30 нКл между двумя точками поля внешними силами совершена работа A = 6 мкДж. Определить работу A_1 сил поля и разность потенциалов $\Delta\varphi$ между точками поля.

2.7 Определить, какая ускоряющая разность потенциалов $\Delta\varphi$ требуется для того, чтобы сообщить протону скорость υ = 15 м/с.

2.8 Бесконечная плоскость равномерно заряжена положительным зарядом с поверхностной плотностью σ. Найти разность потенциалов $\Delta\varphi$ между точкой A, находящейся на расстоянии d от плоскости, и точкой B, находящейся на плоскости.

2.9 Заряд равномерно распределен по бесконечной плоскости с поверхностной плотностью заряда σ = 10 нКл/м^2. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ двух точек поля, одна из которых находится на плоскости, а другая удалена от нее на расстояние r = 10 см.

2.10 Тонкая квадратная рамка равномерно заряжена с линейной плотностью заряда τ = 200 нКл/м. Определить потенциал поля φ в точке пересечения диагоналей.

2.11 Во сколько раз энергия электрического взаимодействия двух неподвижных частиц с зарядом q и массой m больше энергии их гравитационного взаимодействия? Задачу решить для: 1) электронов; 2) протонов.

2.12 Построить график зависимости потенциальной энергии взаимодействия двух точечных зарядов q_1 = 10^{-9} Кл и q_2 = $3\cdot10^{-9}$ Кл, находящихся в воздухе, от расстояния между ними в интервале от r_1 = 0 до r_2 = 10 см через каждые 2 см. Рассмотреть случаи одноименных и разноименных зарядов.

2.13 Электрическое поле создано длинным цилиндром радиусом R = 1 см, равномерно заряженным с линейной плотностью τ = 20 нКл/м. Определить разность потенциалов двух точек поля, находящихся на расстоянии a_1 = 0,5 см и a_2 = 2 см от поверхности цилиндра, в средней его части.

2.14 Тысяча одинаковых, одинаково наэлектризованных дождевых капель сливаются в одну, причем заряды всех капель сохраняются. Как велика будет энергия W заряда большой капли по сравнению с энергией w маленьких капель?

2.15 Два бесконечно длинных параллельных проводника заряжены разноименными зарядами ($\pm q$) с одинаковой линейной плотностью зарядов τ. Определить потенциал поля φ в точке, лежащей на расстояниях r_1 и r_2 от этих проводников.

2.16 Пылинка массой m = 200 мкг и зарядом q = 40 нКл влетела в электростатическое поле в направлении силовых линий. После прохождения разности потенциалов $\Delta\varphi$ = 200 В пылинка имела скорость υ_0 = 10 м/с. Определить скорость пылинки υ после того, как она влетела в поле.

2.17 Какую работу необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние l между пластинами плоского воздушного конденсатора площадью S = 100 см^2 от 0,03 м до 0,1 м? Напряжение между пластинами конденсатора U = 220 В.

2.18 Найти радиус шара R, находящегося в воздухе, если известно, что при заряжении его до потенциала φ = 1200 В поверхностная плотность заряда $\sigma = 4{,}5 \cdot 10^{-7}$ Кл/см^2.

2.19 Шарик массой $m = 10^{-3}$ кг и зарядом $q = 10^{-8}$ Кл перемещается из точки A, потенциал которой φ_A = 699 В, в точку B, потенциал которой φ_B = 0. Чему была равна его скорость υ_A в точке A, если в точке B υ_B = 20 см/с?

2.20 Шар радиусом R_1 = 6 см заряжен до потенциала φ_1 = 300 В, а шар радиусом R_2 = 4 см – до потенциала φ_2 = 50 В. Определить потенциал шаров φ после того, как их соединили металлическим проводником. Емкостью соединительного проводника пренебречь.

2.21 Определить силу взаимного отталкивания F двух шариков в воздухе, если каждый из них заряжен до потенциала φ = 600 В. Диаметр каждого шарика d = 1 см, расстояние между центрами шариков l = 20 см.

2.22 В вершинах правильного шестиугольника со стороной a помещаются точечные заряды одинаковой величины q. Найти потенциал φ и напряженность поля E в центре шестиугольника при условии, что: а) знак всех зарядов одинаков; б) знаки соседних зарядов противоположны.

2.23 Две бесконечные параллельные плоскости находятся на расстоянии d = 1 см друг от друга. Плоскости несут равномерно распределенные по поверхностям заряды с поверхностными плотностями σ_1 = 0,2 мкКл/м^2 и σ_2 = 0,5 мкКл/м^2. Найти разность потенциалов $\Delta\varphi$ пластин.

2.24 Две параллельные заряженные плоскости, поверхностные плотности заряда которых σ_1 = 2 мкКл/м^2 и σ_2 = –0,8 мкКл/м^2, находятся на расстоянии l = 0,6 см друг от друга. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ между пластинами.

2.25 Металлический шарик радиусом r = 1 см заряжен до потенциала φ = 1 В. В каком знаке изменится заряд шарика q, если с шарика вылетят 100 электронов?

2.26 Среднее расстояние электрона от ядра в атоме водорода $\langle r \rangle = 0{,}79 \cdot 10^{-10}$ м. Оценить: а) энергию W_1 кулоновского взаимодействия электрона и ядра; б) сумму энергий W_2 для одного моля атомарного водорода.

2.27 Вычислить скорость υ, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов U, равную: 1) 100 В; 2) 100 кВ.

2.28 Для случая 2) предыдущей задачи сравнить значения υ_k и υ_p, получающиеся по классической и релятивистской формулам.

2.29 Эбонитовый толстостенный полый шар несет равномерно распределенный по объему заряд с плотностью ρ = 2 мкКл/м^3. Внутренний радиус шара R_1 = 3 см, наружный – R_2 = 6 см. Определить потенциал φ шара в различных точках шара: 1) на наружной поверхности; 2) на внутренней поверхности; 3) в центре.

2.30 В некоторой точке напряженность однородного электрического поля E = 600 В/м. Вычислить разность потенциалов ΔU между этой точкой и другой, лежащей на прямой, составляющей угол $\alpha = 60°$ с направлением вектора напряженности. Расстояние между точками l = 2 мм.

2.31 Прямая бесконечная нить несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью τ = 0,1 мкКл/м. Определить работу $A_{1,2}$ сил поля по перемещению заряда q = 50 нКл из точки 1 в точку 2.

2.32 Бесконечно длинная тонкая прямая нить несет равномерно распределенный по длине нити заряд с линейной плотностью τ = 0,01 мкКл/м. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ двух точек поля, удаленных от нити на расстояниях r_1 = 2 см и r_2 = 4 см.

2.33 Поле создано точечным зарядом q = 1 нКл. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ поля в точках поля, удаленных от заряда на расстояние r_1 = 10 см и r_2 = 35 см.

2.34 Какова потенциальная энергия W системы четырех одинаковых точечных зарядов q = 10 нКл, расположенных в вершинах квадрата со стороной a = 10 см?

2.35 По тонкому кольцу радиусом R = 10 см равномерно распределен заряд с линейной плотностью τ = 50 нКл/м. Определить потенциал φ в точке, лежащей на оси кольца, на расстоянии a = 5 см от его центра.

2.36 Восемь одинаковых шарообразных капелек ртути, заряженных до одинакового потенциала $\varphi = 30$ В, сливаются в одну каплю. Каково при этом изменение энергии электростатического поля ΔW, если заряд каждой маленькой капельки $q = 3\cdot10^{-11}$ Кл?

2.37 Найти потенциал поля в центре полусферы радиуса R, заряженной равномерно с поверхностной плотностью заряда σ.

2.38 Сто одинаковых капель ртути, заряженных до потенциала $\varphi = 20$ В, сливаются в одну большую каплю. Каков потенциал φ образовавшейся капли?

2.39 Два шара радиусами $r_1 = 5$ см и $r_2 = 8$ см и потенциалами соответственно $\varphi_1 = 20$ В и $\varphi_2 = 50$ В соединяют проводом. Найти потенциалы шаров φ'_1 и φ'_2 после их соединения и заряд q', перешедший с одного шара на другой.

3 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

3.1 Основные законы и формулы

Диполь есть система двух равных по величине и противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расстояние между которыми значительно меньше расстояния от центра диполя до точек наблюдения. Вектор $\overline{l}$, проведенный от отрицательного заряда диполя к его положительному заряду, называется плечом диполя.

Электрический момент диполя

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

Напряженность и потенциал поля диполя в точке, лежащей на оси диполя, описываются выражениями

$$E = \frac{p}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r^3}, \quad \varphi = \frac{p}{2\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды; r – модуль радиус-вектора, проведенного от центра диполя к рассматриваемой точке поля.

Напряженность и потенциал поля диполя в точке, лежащей на перпендикуляре к плечу диполя, восстановленном из его середины, определяются выражениями

$$E = \frac{p}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^3}, \quad \varphi = 0.$$

Механический момент, действующий на диполь в однородном электрическом поле,

$$\bar{M} = \left[\bar{p} \times \bar{E}\right] \quad \text{и} \quad M = pE\sin\alpha,$$

где α – угол между направлениями векторов дипольного момента и напряженности поля.

Поляризованность

$$\bar{P} = \frac{1}{V}\sum_{i=1}^{N}\bar{p}_i,$$

где N – число молекул, содержащихся в объеме V; $\bar{p}_i$ – электрический момент i-й молекулы.

Связь между поляризованностью и напряженностью поля в диэлектрике имеет вид

$$\bar{P} = \chi\varepsilon_0\bar{E},$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость.

Связь между диэлектрической проницаемостью ε и диэлектрической восприимчивостью χ имеет вид

$$\varepsilon = 1 + \chi.$$

Напряженность $\bar{E}$ среднего макроскопического поля в диэлектрике связана с напряженностью $\bar{E}_0$ внешнего поля соотношениями

$$\bar{E} = \frac{\bar{E}_0}{\varepsilon}, \quad \bar{E} = \bar{E}_0 - \frac{\bar{P}_1}{\varepsilon_0}.$$

Электрическое смещение $\bar{D}$ связано с напряженностью поля $\bar{E}$ и поляризованностью P соотношениями

$$\bar{D} = \varepsilon_0\varepsilon\bar{E}, \quad \bar{D} = \varepsilon\bar{E} + \bar{P}.$$

Теорема Остроградского – Гаусса для электростатического поля в веществе: поток вектора электрического смещения сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности свободных электрических зарядов q_1, q_2, ..., q_n:

$$\Phi_D = \oint_S D_n dS = \sum_{i=1}^{n} q_i,$$

где D_n – проекция вектора электрического смещения на направление нормали к элементу поверхности; $\sum_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма свободных зарядов, заключенных внутри замкнутой поверхности; n – число зарядов.

3.2 Примеры решения задач

Пример 3.1 *Между обкладками плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов U = 1,5 кВ, зажата пластинка толщиной d = 5 мм из парафина (ε = 2). Определить поверхностную плотность связанных зарядов на парафине.*

Дано:	Решение
U = 1,5 кВ = $1{,}5\cdot10^3$ В, d = 5 мм = $5\cdot10^{-3}$ м, ε = 2. σ' – ?	Векторы электрического смещения D и напряженности E связаны между собой соотношением

$$\bar{D} = \varepsilon_0 \bar{E} + \bar{P}, \qquad (1)$$

где $\bar{P}$ – вектор поляризованности диэлектрика.

Так как векторы $\bar{D}$ и $\bar{E}$ нормальны к поверхности диэлектрика, то $D_n = D$ и $E_n = E$ и можно записать

$$D = \varepsilon_0 E + P. \qquad (2)$$

Учитывая, что $P = \sigma'$, т. е. поляризованность равна поверхностной плотности связанных зарядов, перепишем формулу (2) в виде

$$\sigma' = D - \varepsilon_0 E.$$

Поскольку $D = \varepsilon_0\varepsilon E$ и $E = U/d$, где d – расстояние между обкладками конденсатора, то можно найти выражение для поверхностной плотности связанных зарядов:

$$\sigma' = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)\frac{U}{d}. \qquad (3)$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[\sigma'] = \frac{\text{Ф}}{\text{м}}\frac{\text{В}}{\text{м}} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}}\frac{\text{В}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

Полученная величина соответствует единицам измерения плотности заряда.

Подставим в формулу (3) исходные значения и проведем вычисления: σ' = 2,65 мкКл/м^2.

О т в е т: σ' = 2,65 мкКл/м^2.

Пример 3.2 *Диполь с электрическим моментом p = 2 нКл·м находится в однородном электрическом поле напряженностью E = 30 кВ/м. Вектор p составляет угол α_0 = 60° с направлением силовых линий поля. Определить произведенную внешними силами работу A поворота диполя на угол β = 30°.*

Д а н о:
p = 2 нКл·м,
E =30 кВ/м,
α_0 = 60°,
β = 30°.
A – ?

Р е ш е н и е

Из исходного положения (рисунок 1, *а*) диполь можно повернуть на угол $\beta = 30° = \pi/6$ двумя способами: 1) по часовой стрелке (рисунок 1, *б*) до угла

$$\alpha_1 = \alpha_0 - \beta = \pi/3 - \pi/6 = \pi/6$$

или против часовой стрелки (рисунок 1, *в*) до угла

$$\alpha_2 = \alpha_0 + \beta = \pi/3 + \pi/6 = \pi/2.$$

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

Работу, совершаемую при повороте диполя, можно вычислить интегрированием выражения элементарной работы, которая при повороте диполя на угол α определяется выражением

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

работа при повороте на угол от α_0 до α определяется выражением

$$A = \int_{\alpha_0}^{\alpha} pE\sin\alpha d\alpha = pE\int_{\alpha_0}^{\alpha} \sin\alpha d\alpha.$$

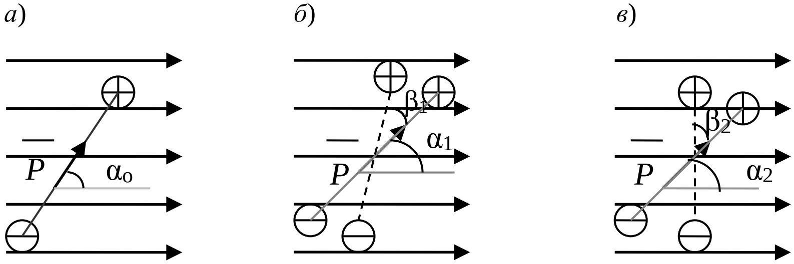


Рисунок 1

Произведя интегрирование, получим

$$A = -pE(\cos\alpha - \cos\alpha_0) = pE(\cos\alpha_0 - \cos\alpha).$$

Тогда, с учетом исходных данных для работы внешних сил при повороте диполя по часовой стрелке

$$A_1 = pE(\cos\alpha_0 - \cos\alpha_1) = -21{,}9 \text{ мкДж};$$

против часовой стрелки

$$A_2 = pE(\cos\alpha_0 - \cos\alpha_2) = 30 \text{ мкДж}.$$

О т в е т: $A_1 = -21{,}9$ мкДж; $A_2 = 30$ мкДж.

3.3 Задачи

3.1 В однородное электростатическое поле напряженностью $E_0 = 700$ В/м перпендикулярно полю помещается бесконечная плоскопараллельная стеклянная пластина. Определить: 1) напряженность E электростатического поля внутри пластины; 2) электрическое смещение D внутри пластины; 3) поляризованность P стекла.

3.2 Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью $\sigma = 1$ мкКл/м^2. На некотором расстоянии от плоскости параллельно ей расположен круг радиусом $r = 10$ см. Вычислить поток N_E вектора напряженности через этот круг.

3.3 Плоский конденсатор состоит из двух пластин, разделенных стеклом. Какое давление p производят пластины на стекло перед пробоем, если напряженность E электрического поля при этом E = 30 МВ/м?

3.4 Вычислить электрический момент p диполя, если его заряд q = 10 нКл, плечо l = 0,5 см.

3.5 Определить заряд диполя q, если его плечо l = 0,3 см, электрический момент p = 48 нКл·м.

3.6 Определить плечо диполя, если его заряд q = 20 нКл, а электрический момент p = 70 нКл·м.

3.7 Определить поляризованность P стекла, помещенного во внешнее электрическое поле напряженностью E_0 = 5 МВ/м.

3.8 Определить напряженность E поля, созданного диполем с электрическим моментом p = 0,4 нКл·м, на расстоянии r = 1 м от центра диполя в направлении, составляющем угол $\alpha = 0°$ с вектором электрического момента.

3.9 Определить напряженность E поля, созданного диполем с электрическим моментом p = 4 пКл·м, на расстоянии r = 10 см от центра диполя в направлении, составляющем угол $\alpha = 60°$ с вектором электрического момента.

3.10 Определить напряженность E поля, созданного диполем с электрическим моментом $p = 10^{-9}$ Кл·м, на расстоянии r = 25 см от центра диполя в направлении, перпендикулярном оси диполя.

3.11 Диэлектрик поместили в электрическое поле напряженностью E_0 = 20 МВ/м. Чему равна поляризованность P диэлектрика, если напряженность среднего макроскопического поля в диэлектрике E = 4 кВ/м?

3.12 В однородное электростатическое поле напряженностью E_0 = 500 В/м перпендикулярно полю помещена бесконечная плоскопараллельная слюдяная пластинка. Определить поверхностную плотность σ связанных зарядов на слюде.

3.13 В однородное электростатическое поле напряженностью E_0 = 750 В/м помещена плоскопараллельная пластина диэлектрика. Определить диэлектрическую восприимчивость вещества пластины, если напряженность результирующего поля внутри нее E = 375 В/м. Какое это вещество?

3.14 В воде электрическое поле напряженностью E = 1,0 кВ/см создает поляризацию, эквивалентную правильной ориентации только одной из молекул. Найти число молекул N, если электрический момент молекулы воды $p = 0{,}62 \cdot 10^{-29}$ Кл·м.

3.15 Расстояние между зарядами диполя ($q = \pm 3{,}2$ нКл) $l = 12$ см. Найти напряженность E и потенциал φ поля, созданного диполем в точке, удаленной на расстояние $r = 8$ см как от первого, так и от второго заряда.

3.16 Какую работу A нужно совершить, чтобы повернуть диполь с моментом p из положения по электрическому полю E в положение против поля?

3.17 Два диполя с электрическими моментами $p_1 = 1$ пКл·м и $p_2 = 4$ пКл·м находятся на расстоянии $r = 2$ см друг от друга. Найти силу их взаимодействия F, если оси диполей лежат на одной прямой.

3.18 Два диполя с электрическими моментами $p_1 = 1$ пКл·м и $p_2 = 4$ пКл·м находятся на расстоянии $r = 2$ см друг от друга так, что их оси лежат на одной прямой. Вычислить взаимную потенциальную энергию диполей W, соответствующую их устойчивому равновесию.

3.19 Диполь с электрическим моментом $p = 20$ пКл·м находится в однородном электрическом поле напряженностью $E = 50$ кВ/м. Вектор электрического момента составляет угол $\alpha = 60°$ с линиями поля. Какова потенциальная энергия W диполя? *(За нулевую потенциальную энергию принять энергию, соответствующую такому расположению диполя, когда вектор электрического момента диполя перпендикулярен линиям поля).*

3.20 Диполь с электрическим моментом $p = 100$ пКл·м свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью $E = 150$ кВ/м. Вычислить работу A, необходимую для того, чтобы повернуть диполь на угол $\alpha = 60°$.

3.21 Диполь с электрическим моментом $p = 100$ пКл·м свободно установился в однородном электрическом поле напряженностью $E = 10$ кВ/м. Определить изменение потенциальной энергии ΔW диполя при повороте его на угол $\alpha = 60°$.

3.22 Перпендикулярно плечу диполя с электрическим моментом $p = 12$ пКл·м возбуждено однородное электрическое поле напряженностью $E = 300$ кВ/м. Под действием сил поля диполь начинает поворачиваться относительно оси, проходящей через его центр. Найти угловую скорость ω диполя в момент прохождения им положения равновесия. Момент инерции диполя относительно оси, перпендикулярной плечу и проходящей через его центр, $I = 2 \cdot 10^{-8}$ Н·м^2.

3.23 В некоторой точке изотропного диэлектрика с проницаемостью ε смещение имеет значение D. Чему равна поляризованность P в этой точке?

3.24 Электрический момент молекулы HF $p = 6{,}4\cdot10^{-30}$ Кл·м. Межъядерное расстояние $d = 92$ пм. Найти заряд q такого диполя и объяснить, почему найденное значение q существенно отличается от значения элементарного заряда $|e|$.

3.25 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком, молекулы которого можно рассматривать как жесткие диполи с электрическим моментом $p = 2\cdot10^{-30}$ Кл·м. Их концентрация $n = 10^{26}$ м$^{-3}$. При отсутствии диэлектрика напряженность поля между пластинами конденсатора $E_0 = 100$ МВ/м. Определить напряженность E макроскопического поля в таком диэлектрике.

3.26 Металлический шар радиусом $R = 5$ см, несущий заряд $q = 10$ нКл, окружен равномерно слоем фарфора толщиной $d = 2$ см. Определить поверхностные плотности σ'_1 и σ'_2 связанных зарядов соответственно на внутренней и внешней поверхностях диэлектрика.

3.27 Сплошной шар из парафина радиусом $R = 10$ см заряжен равномерно с объемной плотностью $\rho = 15$ нКл/м^3. Определить энергию электростатического поля W, заключенную в окружающем шар пространстве.

3.28 Сплошной эбонитовый шар радиусом $R = 5$ см заряжен равномерно с объемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м^3. Определить энергию электростатического поля W, заключенную внутри шара.

3.29 Шар, погруженный в трансформаторное масло, имеет поверхностную плотность $\sigma = 1$ мкКл/м^2 и потенциал $\varphi = 500$ В. Определить: 1) радиус шара R; 2) заряд шара q; 3) емкость шара C; 4) энергию шара W.

3.30 В однородное электростатическое поле напряженностью $E = 700$ В/м перпендикулярно полю поместили стеклянную пластинку толщиной $d = 1{,}5$ мм и площадью $S = 200$ см^2. Определить: 1) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стекле; 2) энергию электростатического поля, сосредоточенную в пластине W.

4 ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСОМ ПОЛЕ

4.1 Основные законы и формулы

Электрическая емкость уединенного проводника или конденсатора

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

где q – заряд, сообщенный проводнику (конденсатору); φ – изменение потенциала, вызванное этим зарядом.

Емкость уединенной проводящей сферы радиусом R, находящейся в среде, имеющей диэлектрическую проницаемость ε, определяется выражением

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

Электрическая емкость плоского конденсатора

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

где S – площадь одной пластины; d – расстояние между пластинами.

Электрическая емкость цилиндрического конденсатора

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln\left(r_2/r_1\right)},$$

где l – длина обкладок конденсатора; r_1 и r_2 – радиусы полых коаксиальных цилиндров.

Электрическая емкость сферического конденсатора

$$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon\frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1},$$

где r_1 и r_2 – радиусы концентрических сфер.

Емкость батареи конденсаторов при последовательном соединении:

а) в общем случае

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n};$$

б) в случае двух конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Емкость батареи конденсаторов при параллельном соединении

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n.$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2} = \frac{q\Delta\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C}.$$

Энергия электростатического поля плоского конденсатора

$$W = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} Sd = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S U^2}{2d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} V,$$

где S – площадь одной пластины; U – разность потенциалов между пластинами; V – объем конденсатора.

Объемная плотность энергии

$$w = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{ED}{2},$$

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

4.2 Примеры решения задач

Пример 4.1 *К пластинам плоского воздушного (ε_1 = 1,0) конденсатора приложена разность потенциалов U_1 = 1,5 кВ. Площадь пластин S = 150 см^2 и расстояние между ними d = 5 мм. После отключения конденсатора от источника напряжения в пространство между пластинами внесли стекло (ε_2 = 7,0). Определить: 1) разность потенциалов между пластинами после внесения диэлектрика; 2) емкость конденсатора до и после внесения диэлектрика; 3) поверхностную плотность заряда на пластинах до и после внесения диэлектрика.*

Дано:
U_1=1,5 кВ =$1{,}5\cdot 10^3$ В,
S_1=150 см^2 = $1{,}5\cdot 10^{-2}$м^2,
ε_1 = 1,0,
ε_2 = 7,0,
d = 5 мм = $5\cdot 10^{-3}$м.
U_2, C_1, C_2, σ_1, σ_2 – ?

Решение

Так как $E = \sigma/(\varepsilon_0\ \varepsilon) = U/d$, то до внесения диэлектрика $\sigma d = U_1\varepsilon_0\varepsilon_1$ и после внесения $\sigma d = U_2\varepsilon_0\varepsilon_2$, поэтому можно записать $U_2 = \dfrac{\varepsilon_1 U_1}{\varepsilon_2}$.

Емкость конденсатора до и после включения диэлектрика определяется соответственно выражениями

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_1 S}{d} \text{ и } C_2 = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_2 S}{d}.$$

Заряд пластин после отключения от источника напряжения не меняется, т. е. Q = const. Поэтому поверхностная плотность заряда на пластинах до и после внесения диэлектрика находится по формуле

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{Q}{S} = \frac{C_1 U_1}{S} = \frac{C_2 U_2}{S}.$$

Подставим в полученные соотношения исходные значения и, проведя вычисления, получим: U_2 = 214 В; C_1 = 26,5 пФ; C_2 = 186 пФ; $\sigma_1 = \sigma_2$ = 2,65 мкКл/м^2.

Ответ: U_2 = 214 В; C_1 = 26,5 пФ; C_2 = 186 пФ;
$\sigma_1 = \sigma_2$ = 2,65 мкКл/м^2.

Пример 4.2 *Конденсатор емкостью C_1 = 3 мкФ заряжен до напряжения U_1 = 300 В, а конденсатор емкостью C_2 = 2 мкФ – до U_2 = 200 В. Определить напряжение между пластинами конденсатора после соединения их: 1) одноименно заряженными пластинами; 2) разноименно заряженными пластинами. Какое количество теплоты выделится в результате соединения в первом случае?*

Дано:
C_1 = 3 мкФ,
U_1 = 300 В,
C_2 = 2 мкФ,
U_2 = 200 В.
Q, E_1, E_2 – ?

Решение

Если конденсаторы соединены параллельно, то их общая емкость $C = C_1 + C_2$. Так как соединялись одноименно заряженные пластины, то искомое напряжение $U = \dfrac{q}{C} = \dfrac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}$, где q_1 и q_2 – заряды конденсаторов до соединения.

Учитывая, что $q_1 = C_1 U_1$ и $q_2 = C_2 U_2$, получим

$$U = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2} = 260 \text{ В}.$$

Если конденсаторы соединены разноименно заряженными пластинами, то напряжение между ними

$$U = \frac{C_1 U_1 - C_2 U_2}{C_1 + C_2} = 100 \text{ В}.$$

Количество выделившейся теплоты определим, пользуясь законом сохранения и превращения энергии. Энергия конденсаторов до соединения

$$E_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} = 175 \text{ мДж},$$

после соединения

$$E_2 = \frac{CU^2}{2} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2}\right) U^2 = 169 \text{ мДж}.$$

Следовательно, искомое количество теплоты

$$Q = E_1 - E_2 = 6 \text{ мДж}.$$

Ответ: $Q = 6$ мДж.

Пример 4.3 *Определить электрическую емкость C плоского конденсатора с двумя слоями диэлектриков: фарфор толщиной $d_1 = 2$ мм ($\varepsilon_1 = 5{,}0$) и эбонит толщиной $d_2 = 1{,}5$ мм ($\varepsilon_2 = 2{,}7$) если площадь пластин $S = 100$ см^2.*

Дано:
$d_1 = 2$ мм,
$d_2 = 1{,}5$ мм,
$S = 100$ см^2.
C – ?

Решение

Емкость конденсатора, по определению, $C = Q/U$, где Q – заряд на пластинах конденсатора, U – разность потенциалов пластин.

Заменив в этом равенстве общую разность потенциалов U конденсатора суммой $U_1 + U_2$ на слоях диэлектриков, получим

$$C = \frac{Q}{U_1 + U_2}. \tag{1}$$

Приняв во внимание, что

$$Q = \sigma S; U_1 = E_1 d_1 = \frac{D}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} d_1; U_2 = E_2 d_2 = \frac{D}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} d_2,$$

равенство (1) можно переписать в виде

$$C = \frac{\sigma S}{\frac{D d_1}{\varepsilon_0 \varepsilon_1} + \frac{D d_2}{\varepsilon_0 \varepsilon_1}}, \tag{2}$$

где σ – поверхностная плотность заряда на пластинах; E_1 и E_2 – напряженности поля в первом и втором слоях диэлектрика соответственно; D – электрическое смещение поля в диэлектриках.

Умножив числитель и знаменатель равенства на ε_0 и учитывая, что $D = \sigma$, окончательно получим

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{(d_1 / \varepsilon_1) + (d_2 / \varepsilon_2)}. \tag{3}$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[C] = \frac{\frac{\text{Ф}}{\text{м}} \cdot \text{м}^2}{\text{м} + \text{м}} = \text{Ф}.$$

Подставим числовые значения величин в формулу (3) и, сделав вычисления, получим C = 92,2 пФ.

О т в е т: C = 92,2 пФ.

Пример 4.4 *Конденсатор электроемкостью C_1 = 3 мкФ был заряжен до разности потенциалов U_1 = 40 В. После отключения от источника тока конденсатор был соединен параллельно с другим незаряженным конденсатором электроемкостью C_2 = 5 мкФ. Определить энергию ΔW, израсходованную на образование искры в момент присоединения второго конденсатора.*

Д а н о:
C_1 = 3 мкФ,
U_1 = 40 В,
C_2 = 5 мкФ.
ΔW – ?

Р е ш е н и е

Энергия, израсходованная на образование искры, определяется выражением

$$\Delta W = W_1 - W_2, \tag{1}$$

где W_1 – энергия, которой обладал первый конденсатор до присоединения к нему второго конденсатора; W_2 – энергия, которую имеет батарея, составленная из первого и второго конденсаторов.

Подставив в выражение (1) формулу для энергии заряженного конденсатора

$$W = CU^2/2$$

и приняв во внимание, что общая электроемкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме электроемкостей отдельных конденсаторов, получим

$$\Delta W = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2)U_2^2}{2}, \tag{2}$$

где C_1 и C_2 – электроемкости первого и второго конденсаторов; U_1 – разность потенциалов, до которой был заряжен первый конденсатор; U_2 – разность потенциалов на зажимах батареи конденсаторов.

Учитывая, что заряд после присоединения второго конденсатора остался прежним, выразим разность потенциалов U_2:

$$U_2 = \frac{Q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2}. \tag{3}$$

Подставив выражение (3) в формулу (2), получим

$$\Delta W = \frac{C_1 U_1^2}{2} - \frac{(C_1 + C_2)C_1^2 U_1^2}{2(C_1 + C_2)^2}.$$

После простых преобразований найдем

$$\Delta W = \frac{1}{2}\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} U_1^2.$$

Подставив в эту формулу исходные данные и выполнив вычисления, получим ΔW = 1,5 мДж.

Проведем проверку размерностей

$$[\Delta W] = \frac{\Phi \cdot \Phi}{\Phi} \cdot \text{В}^2 = \text{Дж}.$$

О т в е т : ΔW = 1,5 мДж.

Пример 4.5 *Плоский конденсатор заряжен до разности потенциалов U = 1 кВ. Расстояние между пластинами d = 1 см. Диэлектрик между пластинами – стекло. Определить объемную плотность энергии поля конденсатора.*

Д а н о:
U = 1 кВ,
d = 0,01 м.
ω – ?

Р е ш е н и е

Объемная плотность энергии поля конденсатора

$$\omega = W/V, \qquad (1)$$

где W – энергия поля конденсатора; V – объем, занимаемый полем, т. е. объем пространства, заключенного между пластинами плоского конденсатора.

Энергия поля конденсатора определяется по формуле

$$W = CU^2/2, \qquad (2)$$

где U – разность потенциалов, до которой заряжены пластины конденсатора; C – его электроемкость.

С учетом формулы (2) и того, что $C = \varepsilon\varepsilon_0 S/d$ и $V = Sd$, выражение (1) можно переписать в виде

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 U^2}{2d^2}. \qquad (3)$$

Проверим размерность полученной формулы:

$$[\omega] = \frac{\frac{\Phi}{\text{м}} \cdot \text{В}^2}{\text{м}^2} = \frac{\Phi \cdot \text{В}^2}{\text{м}^3} = \frac{\text{К}}{\text{В}} \cdot \frac{\text{В}^2}{\text{м}^3} = \frac{\text{К} \cdot \text{В}}{\text{м}^3} = \frac{\text{кг}^3 \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}.$$

Подставив в формулу (3) исходные данные и выполнив вычисления, получим: ω = 0,309 Дж/м^3.

О т в е т: ω = 0,309 Дж/м^3.

Пример 4.6 *Плоский воздушный конденсатор с площадью обкладок S = 200 см каждая и расстоянием между ними l = 5 мм заряжается до разности потенциалов U₀ = 600 В и затем отключается от батареи. Как изменяются емкость и энергия конденсатора, если в пространство между обкладками параллельно им внести металлическую пластину такой же площади и толщиной l′ = 2 мм?*

Дано:
S = 200 см,
l = 5 мм,
U_0 = 600 В,
l' = 2 мм.
ΔW – ?

Решение

Уменьшение расстояния между обкладками за счет внесения пластины вызовет увеличение емкости конденсатора на величину

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{l - l'} - \frac{\varepsilon_0 S}{l} = 23{,}6 \cdot 10^{-12}\,\text{Ф},$$

где C_2 – конечная емкость конденсатора после внесения металлической пластины.

Изменение энергии конденсатора может быть рассчитано двумя способами.

1 Поскольку конденсатор отключен от батареи, заряд на его обкладках остается постоянным и равным $Q = C_1U_0$, где C_1 – начальная емкость конденсатора.

Изменение энергии конденсатора при изменении емкости определяется выражением

$$\Delta W = \frac{Q^2}{2}\left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_1}\right) = -\frac{\varepsilon_0 S U_0^2}{2l^2} l' = -2{,}5 \cdot 10^{-6}\,\text{Дж}. \qquad (1)$$

2 Постоянство заряда на обкладках конденсатора обусловливает постоянство напряженности поля, а следовательно, и плотности энергии.

В связи с тем, что внутри внесенной металлической пластины поля нет, то убыль энергии конденсатора ΔW равна энергии электрического поля в объеме металлической пластинки:

$$\Delta W = -\frac{\varepsilon_0 E^2}{2} S l',$$

где E – напряженность поля между обкладками.

Так как напряженность поля $E = U_0/l$, то окончательное выражение

$$\Delta W = -\frac{\varepsilon_0 U_0^2}{2l^2} Sl'$$

совпадает с формулой (1). Подставляя в него численные значения, получим $\Delta W = -2{,}5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

О т в е т : $\Delta W = -2{,}5 \cdot 10^{-6}$ Дж.

4.3 Задачи

4.1 Определить электроемкость плоского слюдяного конденсатора, площадь пластин которого $S = 100$ см^2, а расстояние между ними $d = 0{,}1$ мм.

4.2 Два одинаковых плоских воздушных конденсатора емкостью $C = 100$ пФ каждый соединены в батарею последовательно. Определить, насколько изменится емкость батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить парафином.

4.3 Две концентрические металлические сферы, имеющие радиусы $r_1 = 2{,}0$ см и $r_2 = 2{,}1$ см, образуют сферический конденсатор. Определить его электроемкость C, если пространство между сферами заполнено парафином.

4.4 В плоском, горизонтально расположенном конденсаторе заряженная капелька ртути находится в равновесии при напряженности электрического поля $E = 600$ В/см. Заряд капли $q = 2{,}4 \cdot 10^{-7}$ Кл. Найти радиус капли.

4.5 Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора $\Delta\varphi = 90$ В. Площадь каждой пластины $S = 60$ см^2 и заряд $q = 10^{-9}$ Кл. На каком расстоянии r друг от друга находятся пластины?

4.6 Между горизонтальными пластинами плоского конденсатора находится в равновесии капелька масла, заряженная десятью электронами. Определить радиус капельки r, если разность потенциалов между пластинами конденсатора $\Delta\varphi = 500$ В, расстояние между пластинами $d = 2{,}5$ см. Выталкивающей силой воздуха пренебречь.

4.7 Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины к другой, приобретает скорость $\upsilon = 10^8$ см/с. Расстояние между пластинами $l = 5{,}3$ мм. Найти: 1) разность потенциалов $\Delta\varphi$ между пластинами; 2) напряженность E электрического поля внутри конденсатора; 3) поверхностную плотность заряда σ на пластинах.

4.8 Между пластинами плоского конденсатора находится точечный заряд $q = 30$ нКл. Поле конденсатора действует на заряд с силой $F_q = 10$ мН. Определить силу взаимного притяжения пластин F, если площадь пластины $S = 100$ см^2.

4.9 Два конденсатора емкостью C_1 и C_2 заряжены до напряжений U_1 и U_2 соответственно. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ между обкладками конденсаторов, если: 1) попарно между собой соединены разноименно заряженные обкладки конденсаторов; 2) попарно между собой соединены одноименно заряженные обкладки конденсаторов.

4.10 Два одинаковых плоских воздушных конденсатора емкостью $C_1 = C_2 = 100$ пФ каждый соединены в батарею параллельно. Определить, насколько изменится емкость C батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить слюдой.

4.11 Шарик, имеющий массу $m = 0{,}4$ г и заряд $q = 5$ нКл, подвешен на нити в поле плоского воздушного конденсатора, заряд которого $q = 4$ нКл и площадь пластины $S = 50$ см^2. На какой угол α от вертикали отклонится при этом нить с шариком?

4.12 Два конденсатора емкостью $C_1 = 5$ мкФ и $C_2 = 8$ мкФ соединены последовательно и присоединены к батарее, с ЭДС $\varepsilon = 80$ В. Определить заряды q_1 и q_2 конденсаторов и разности потенциалов $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ между их обкладками.

4.13 Конденсаторы, имеющие емкости $C_1 = 2$ мкФ, $C_2 = 5$ мкФ и $C_3 = 10$ мкФ соединены последовательно и находятся под напряжением $U = 850$ В. Определить напряжение и заряд на каждом из конденсаторов.

4.14 Электрон влетает в плоский горизонтальный конденсатор параллельно пластинам со скоростью $\upsilon = 9\cdot10^5$ м/с. Разность потенциалов между пластинами $\Delta\varphi = 100$ В, расстояние между пластинами $l = 1$ см. Найти полное, нормальное и тангенциальное ускорение электрона через время $\tau = 10^{-8}$ с после начала его движения.

4.15 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено двумя слоями диэлектрика: стекло толщиной $d_1 = 0{,}2$ см и парафин толщиной $d_2 = 0{,}3$ см. Разность потенциалов между обкладками $U = 300$ В. Определить напряженность E поля и падение напряжения ΔU в каждом из слоев.

4.16 Конденсатор электроемкостью C_1 = 0,6 мкФ был заряжен до разности потенциалов U_1 = 300 В и соединен со вторым конденсатором электроемкостью C_2 = 0,4 мкФ, заряженным до разности потенциалов U_2 = 150 В. Найти заряд Δq, перетекший с пластин первого конденсатора на второй.

4.17 Между пластинами плоского конденсатора помещено два слоя диэлектрика – слюдяная пластинка толщиной d_1 = 1 мм и парафин толщиной d_2 = 0,5 мм. Определить: 1) напряженность электростатических полей в слоях диэлектрика; 2) электрическое смещение, если разность потенциалов между пластинами конденсатора U = 500 В.

4.18 Как нужно соединить конденсаторы C_1 = 2 пФ, C_2 = 4 пФ и C_3 = 6 пФ, чтобы получить систему с емкостью C = 3 пФ?

4.19 На два последовательно соединенных конденсатора C_1 = 100 пФ и C_2 = 200 пФ подано постоянное напряжение U = 300 В. Определить напряжения U_1 и U_2 на конденсаторах и заряд q на их обкладках. Какова емкость C системы?

4.20 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов U_1 = 500 В. Площадь пластин S = 200 см^2, расстояние между ними d = 1,5 мм. После отключения конденсатора от источника напряжения в пространство между пластинами внесли парафин. Определить разность потенциалов U_2 между пластинами после внесения диэлектрика, а также емкости конденсатора C_1 и C_2 до и после внесения диэлектрика.

4.21 Между пластинами плоского конденсатора приложена разность потенциалов $\Delta\varphi$ = 150 В. Площадь каждой пластины S = 200 см^2, заряд q = 10 нКл, диэлектрик – слюда. Определить расстояние между пластинами конденсатора.

4.22 Определить емкость коаксиального кабеля длиной l = 10 м, если радиус его центральной жилы r_1 = 1,0 см, радиус оболочки r_2 = 1,5 см, а изоляционным материалом служит резина.

4.23 Сферический конденсатор состоит из двух концентрических сфер радиусами r_1 = 5,0 см и r_2 = 5,5 см. Пространство между обкладками конденсатора заполнено трансформаторным маслом. Определить: 1) емкость этого конденсатора; 2) шар какого радиуса, помещенный в масло, обладает такой же емкостью.

4.24 Определить напряженность электростатического поля на расстоянии d = 1,0 см от оси коаксиального кабеля, если радиус его центральной жилы r_1 = 0,5 см, а радиус оболочки r_2 = 1,5 см. Разность потенциалов между центральной жилой кабеля и оболочкой $\Delta\varphi = 1$ кВ.

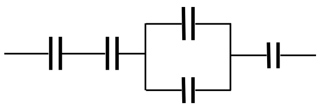
4.25 Определить напряженность электростатического поля на расстоянии $x = 2$ см от центра воздушного сферического конденсатора, образованного двумя шарами (внутренний радиус $r_1 = 1$ см, внешний – $r_2 = 3$ см), между которыми приложена разность потенциалов $\Delta\varphi = 1$ кВ.

4.26 Два плоских воздушных конденсатора одинаковой емкости соединены параллельно и заряжены до разности потенциалов $\Delta\varphi =$ $= 300$ В. Определить разность потенциалов этой системы, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить слюдой.

4.27 Емкость батареи конденсаторов, образованной двумя последовательно соединенными конденсаторами, $C = 100$ пФ, а заряд $q = 20$ нКл. Определить емкость второго конденсатора C_2, а также разность потенциалов на обкладках каждого конденсатора, если $C_1 = 200$ пФ.

4.28 Разность потенциалов между точками A и B $U = 9$ В. Емкости конденсаторов соответственно равны $C_1 = 3$ мкФ и $C_2 = 6$ мкФ. Определить: 1) заряды q_1 и q_2; 2) разность потенциалов $\Delta\varphi$ на обкладках каждого конденсатора.

4.29 Определить емкость C батареи конденсаторов. Емкость каждого конденсатора $C_i = 1$ мкФ.



4.30 Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора $\Delta\varphi = 100$ В. Площадь каждой пластины $S = 200$ см^2, расстояние между пластинами $d = 0{,}5$ мм, пространство между ними заполнено парафином. Определить силу притяжения пластин друг к другу.

4.31 Между пластинами плоского конденсатора площадью S находится два слоя диэлектриков: стекло толщиной d_1 и эбонит толщиной d_2. Найти емкость конденсатора C, если толщина воздушного зазора равна d_3.

4.32 Какую работу A необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора площадью $S = 100$ см^2 от $l_1 = 0{,}03$ м до $l_2 = 0{,}1$ м? Напряжение между пластинами конденсатора $U = 220$ В.

4.33 Два одинаковых плоских воздушных конденсатора емкостью $C_1 = C_2 = 100$ пФ каждый соединены в батарею последовательно. Определить, как изменится емкость батареи C, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить парафином?

4.34 Плоский конденсатор площадью пластин $S = 200$ см^2 каждая заряжен до разности потенциалов $\Delta\varphi = 2$ кВ. Пространство между пластинами, находящимися на расстоянии $d = 2$ см, заполнено стеклом. Определить энергию W поля конденсатора и плотность w энергии поля.

4.35 Вычислить энергию поля металлического шара, которому сообщен заряд $q = 100$ нКл, если диаметр шара $d = 20$ см.

4.36 Найти объемную плотность энергии электростатического поля в точке на расстоянии 2 см от поверхности заряженного шара радиусом $R = 1$ см, помещенного в парафин. Поверхностная плотность заряда шара $\sigma = 16{,}5$ мкКл/м^2.

4.37 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 2$ мм, разность потенциалов $\Delta\varphi = 600$ В. Заряд каждой пластины $q = 40$ нКл. Определить энергию W поля конденсатора и силу F взаимного притяжения пластин.

4.38 Два металлических шарика $R_1 = 5$ см и $R_2 = 10$ см имеют заряды $q_1 = 40$ нКл и $q_2 = -20$ нКл соответственно. Найти энергию W, которая выделится при разряде, если шары соединить проводником.

4.39 Металлический шар радиусом $R = 3$ см имеет заряд $q = 20$ нКл. Шар погружен в керосин так, что не касается стенок сосуда. Определить объемную плотность энергии поля w в точках, отстоящих от центра шара на расстояниях $r_1 = 2$ и $r_2 = 4$ см.

4.40 Пространство между пластинами плоского конденсатора объемом $V = 20$ см^3 заполнено фарфором. Пластины конденсатора присоединены к источнику напряжения. При этом поверхностная плотность связанных зарядов на диэлектрике $\sigma' = 8{,}5 \cdot 10^{-6}$ Кл/м^2. Какую работу A надо совершить против сил электрического поля, чтобы удалить диэлектрик после отключения источника напряжения?

4.41 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $\Delta\varphi_1 = 450$ В. Площадь пластин $S = 150$ см^2, расстояние между ними $d_1 = 2{,}0$ мм. Пластины раздвинули до расстояния $d_2 = 10$ мм. Найти энергию W_1 и W_2 конденсатора до и после раздвижения пластин, если источник перед этим: 1) отключался; 2) не отключался.

4.42 Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора $\Delta\varphi = 100$ В. Площадь каждой пластины $S = 200$ см^2, расстояние между пластинами $d = 0{,}5$ мм, пространство между ними заполнено парафином. Определить силу притяжения F пластин друг к другу.

4.43 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено слюдой. Площадь пластин конденсатора $S = 50$ см^2. Определить поверхностную плотность σ' связанных зарядов на слюде, если пластины конденсатора притягивают друг друга с силой $F = 1$ мН.

4.44 Конденсатору, электроемкость которого $C = 10$ пФ, сообщен заряд $q = 1$ пКл. Определить энергию W конденсатора.

4.45 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 2$ см, разность потенциалов $\Delta\varphi = 6$ кВ. Заряд каждой пластины $q = 10$ нКл. Вычислить энергию W поля конденсатора и силу F взаимного притяжения пластин.

4.46 Какое количество теплоты Q выделится при разряде плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами $\Delta\varphi = 15$ кВ, расстояние $d = 1$ мм, диэлектрик – слюда и площадь каждой пластины $S = 300$ см^2?

4.47 Сила притяжения между пластинами плоского воздушного конденсатора $F = 50$ мН. Площадь каждой пластины $S = 200$ мм^2. Найти плотность энергии w поля конденсатора.

4.48 Плоский воздушный конденсатор состоит из двух круглых пластин радиусом $r = 10$ см каждая. Расстояние между пластинами $d_1 = 1$ см. Конденсатор зарядили до разности потенциалов $\Delta\varphi = 1{,}2$ кВ и отключили от источника тока. Какую работу A нужно совершить, чтобы, удаляя пластины друг от друга, увеличить расстояние между ними до $d_2 = 3{,}5$ см?

4.49 Конденсаторы электроемкостями $C_1 = 1$ мкФ, $C_2 = 2$ мкФ, $C_3 = 3$ мкФ включены в цепь с напряжением $U = 1{,}1$ кВ. Определить энергию каждого конденсатора W_i в случаях их подключения: 1) последовательно; 2) параллельно.

4.50 Плоский воздушный конденсатор электроемкостью $C = 1{,}11$ нФ заряжен до разности потенциалов $\Delta\varphi = 300$ В. После отключения от источника тока расстояние между пластинами конденсатора было увеличено в пять раз. Определить: 1) разность потенциалов U на обкладках конденсатора после их раздвижения; 2) работу A внешних сил по раздвижению пластин.

4.51 Конденсатор электроемкостью C_1 = 666 пФ зарядили до разности потенциалов $\Delta\varphi$ = 1,5 В и отключили от источника тока. Затем к конденсатору присоединили параллельно второй, незаряженный конденсатор электроемкостью C_2 = 444 пФ. Определить энергию W, израсходованную на образование искры, проскочившей при соединении конденсаторов.

4.52 Найти энергию W уединенной сферы радиусом R = 4 см, заряженной до потенциала φ = 500 В.

4.53 Электроемкость плоского конденсатора C = 111 пФ. Диэлектрик – фарфор. Конденсатор зарядили до разности потенциалов $\Delta\varphi$ = 600 В и отключили от источника напряжения. Какую работу A нужно совершить, чтобы вынуть диэлектрик из конденсатора? Трением диэлектрика о пластины конденсатора пренебречь.

4.54 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком (фарфор), объем которого V = 100 см^3. Поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора σ = 8,5 нКл/м^2. Вычислить работу A, которую необходимо совершить для того, чтобы удалить диэлектрик из конденсатора. Трением диэлектрика о пластины конденсатора пренебречь.

4.55 Уединенная металлическая сфера электроемкостью C = 10 пФ заряжена до потенциала φ = 3 кВ. Определить энергию W поля, заключенного в сферическом слое, ограниченном сферой и концентрической к ней сферической поверхностью, радиус которой в три раза больше радиуса сферы.

4.56 Конденсаторы емкостью C_1 и C_2 заряжены до напряжения U_1 и U_2 соответственно. Насколько изменится суммарная электрическая энергия конденсаторов, если соединить попарно между собой: 1) одноименно заряженные обкладки конденсаторов; 2) разноименно заряженные обкладки конденсаторов?

4.57 Конденсатор емкостью C = 3 мкФ был заряжен до разности потенциалов φ = 40 В. После отключения от источника тока конденсатор был соединен параллельно с другим незаряженным конденсатором емкостью C_2 = 5 мкФ. Определить какое количество энергии первого конденсатора израсходуется на образование искры в момент присоединения второго конденсатора?

4.58 Пластины плоского конденсатора раздвигаются первый раз, будучи все время подключенными к источнику напряжения, а второй раз – отключенными сразу после зарядки. В каком случае затрачиваемая на раздвигание пластин работа больше?

4.59 Определить работу A, которую нужно совершить, чтобы увеличить на Δx = 0,2 мм расстояние x между пластинами плоского воздушного конденсатора, заряженными разноименными зарядами q = 0,2 мкКл. Площадь каждой пластины S = 400 см^2.

4.60 В центре сферической оболочки, равномерно заряженной зарядом q = 5,0 мкКл, расположен точечный заряд q_0 = 1,50 мкКл. Найти работу A электрических сил при расширении оболочки – увеличении ее радиуса от R_1 = 50 мм до R_2 = 100 мм.

5 ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

5.1 Основные законы и формулы

Сила тока определяется количеством электричества, проходящим через поперечное сечение проводника в единицу времени:

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

Плотность тока есть векторная величина, измеряемая отношением силы тока к единице площади поперечного сечения проводника:

$$\bar{j} = \frac{dI}{dS}\bar{k},$$

где $\bar{k}$ – единичный вектор, совпадающий по направлению с направлением движения положительных зарядов.

Плотность тока в проводнике

$$\bar{j} = nq\langle\bar{\upsilon}\rangle,$$

где n – концентрация носителей заряда; $\langle\bar{\upsilon}\rangle$ – средняя скорость упорядоченного движения зарядов в проводнике.

Закон Ома:

а) для однородного участка цепи (т. е. не содержащего ЭДС)

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R};$$

б) для неоднородного участка цепи

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R};$$

в) для замкнутой цепи

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

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов на концах участка цепи; ε_{12} – ЭДС источников тока, входящих в участок; ε – ЭДС всех источников тока цепи; R – сопротивление цепи (участка цепи).

Закон Ома в дифференциальной форме – плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля в данной точке проводника:

$$\bar{j} = \gamma \bar{E},$$

где $\gamma = 1/\rho$ – удельная проводимость материала проводника.

Сопротивление однородного проводника

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

где ρ – удельное сопротивление материала проводника; l – длина проводника; S – площадь поперечного сечения проводника.

Зависимость удельного сопротивления от температуры

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

где ρ и ρ_0 – удельные сопротивления при t и 0 °С соответственно; α – температурный коэффициент сопротивления; t – температура (по шкале Цельсия).

Сопротивление проводников при последовательном и параллельном соединениях:

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i; \quad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i},$$

где n – число проводников, R_i – сопротивление i-го проводника.

Правила Кирхгофа для разветвленных цепей:

1) алгебраическая сумма токов, сходящихся в любом узле, равна нулю:

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

где n – число токов, сходящихся в узле;

2) для любого замкнутого контура алгебраическая сумма произведений сил токов на сопротивления соответствующих участков цепи равна алгебраической сумме всех ЭДС, действующих в этом контуре:

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

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

Работа, совершаемая электростатическим полем и сторонними силами в участке цепи постоянного тока за время t,

$$A = IUt.$$

Мощность тока

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

Закон Джоуля – Ленца определяется соотношением

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

где Q – количество теплоты, выделяющееся в участке цепи постоянного тока за время t. Закон Джоуля – Ленца справедлив при условии, что участок неподвижен и в нем не протекают химические реакции.

Закон Джоуля – Ленца в дифференциальной форме определяется соотношением:

$$w = jE = \gamma E^2 ,$$

где w – удельная тепловая мощность тока.

Закон Видемана – Франца определяется соотношением:

$$\frac{\lambda}{\gamma} = 3\frac{k^2}{e^2}T,$$

где λ – коэффициент теплопроводности; γ – удельная проводимость материала проводника; k – постоянная Больцмана; e – заряд электрона; T – термодинамическая температура.

5.2 Примеры решения задач

Пример 5.1 *Сила тока в проводнике сопротивлением R = 10 Ом возрастает за время t = 10 с по линейному закону от нуля до 6 А. Определить, какой заряд был перенесен через поперечное сечение проводника и какое количество теплоты выделилось в проводнике за это время.*

Дано:	Решение
$R = 10$ Ом, $I_0 = 0$ А, $I_{max} = 6$ А, $t = 10$ с. Q, q – ?	При силе тока I за время dt переносится заряд $dq = Idt$. В нашем случае сила тока является функцией времени

$$I = kt, \qquad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, который можно найти из соотношения

$$k = \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1}.$$

Тогда $dq = ktdt$. Проинтегрировав это выражение в пределах от t_1 до t_2, получим

$$q = \int_{t_1}^{t_2} ktdt = \frac{1}{2}k(t_2^2 - t_1^2).$$

Подставив в полученное выражение значение k, получим выражение для заряда:

$$q = \frac{1}{2}\frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1}(t_2^2 - t_1^2) = \frac{1}{2}(I_2 - I_1)(t_2 + t_1). \qquad (2)$$

Для определения количества теплоты Q запишем закон Джоуля – Ленца для бесконечно малого промежутка времени:

$$dQ = I^2Rdt.$$

Учитывая выражение (1), его можно записать в виде

$$dQ = k^2t^2Rdt.$$

Тогда после интегрирования получим

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} k^2Rt^2dt = \frac{1}{3}k^2R(t_2^3 - t_1^3) = \frac{1}{3}R(\frac{I_2 - I_1}{t_2 - t_1})^2 I(t_2^3 - t_1^3). \qquad (3)$$

Проверим, дают ли расчетные формулы (2) и (3) соответствующие единицы:

$$[q] = \text{А}\cdot\text{с} = \text{Кл}; \quad [Q] = \text{Ом}\cdot\frac{\text{А}}{\text{с}^2}\cdot\text{с}^3 = \text{Ом}\cdot\text{А}\cdot\text{А}\cdot\text{с} = \text{В}\cdot\text{А}\cdot\text{с} = \text{Вт}\cdot\text{с} = \text{Дж}.$$

Полученная размерность соответствует единицам измерения теплоты в системе СИ.

Подставим числовые значения величин в формулы (2), (3) и проведем вычисления:

$$q = \frac{1}{2}(6-0)(10\ -0)\ = 30\ \text{Кл};$$

$$Q = \frac{1}{3}\cdot 10\,\frac{6-0}{10-0}(10^3 - 0) = 1{,}2\ \text{кДж}.$$

О т в е т: q = 30 Кл; Q = 1,2 кДж.

Пример 5.2 *Сопротивление нити электрической лампочки мощностью P = 100 Вт в накаленном состоянии в n = 12 раз больше, чем при температуре t_1 = 10 °С. Определить сопротивление нити при обеих температурах и температурный коэффициент расширения α, если в накаленном состоянии температура нити t_2 = 2500 °С.*

Д а н о:
P = 100 Вт,
n=12,
t_1=10 °С,
t_2=2500 °С.
R_1, R_2, α – ?

Р е ш е н и е

Если сопротивление лампы при 0 °С принять равным R_0, при 10 °С – R_1, при 2500 °С – R_2, то можно записать

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

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

$$\frac{R_1}{R_2} = n = \frac{1+\alpha t_1}{1+\alpha t_2}.$$

Отсюда следует

$$\alpha = \frac{n-1}{t_2 - nt_1} = 4{,}62 \cdot 10^{-3}\ °\text{C}^{-1}.$$

Зная мощность лампы P, можно определить сопротивления R_2 и R_1:

$$R_2 = \frac{U^2}{P} = 484\ \text{Ом};\ R_1 = \frac{R_2}{n} = \frac{U^2}{Pn} = 32{,}3\,\text{Ом}.$$

Ответ: $\alpha = 4{,}62 \cdot 10^{-3}$ °С$^{-1}$; $R_1 = 32{,}3$ Ом; $R_2 = 484$ Ом.

Пример 5.3 *Батарея из двух элементов с ЭДС $\varepsilon_1 = 8$ В, $\varepsilon_2 = 4$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1$ Ом, $r_2 = 0{,}5$ Ом и сопротивление $R = 50$ Ом соединены, как показано на рисунке 1. Определить силу тока в резисторе.*

Дано:
$\varepsilon_1 = 8$ В,
$\varepsilon_2 = 4$ В,
$r_1 = 1{,}0$ Ом,
$r_2 = 0{,}5$ Ом,
$R = 50$ Ом.

I – ?

Решение

Выберем направление обхода контуров по часовой стрелке и применим правила Кирхгофа для каждого из контуров. Если источники соединены так, как показано на рисунке 1, *а*, то для узла A по первому закону Кирхгофа можно записать

$$I_2 + I = I_1. \tag{1}$$

Для контуров $\varepsilon_1 BRA\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2 BRA\varepsilon_2$ по второму закону Кирхгофа справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} I_1 r_1 + IR = \varepsilon_1; \\ -I_2 r_2 + IR = \varepsilon_2. \end{cases} \tag{2}$$

Выражаем из системы (2) I_1 и I_2 и подставим их в уравнение (1), получим

$$\frac{-\varepsilon_2 + IR}{r_2} + I = \frac{\varepsilon_1 - IR}{r_1}$$

или

$$-\varepsilon_2 r_1 + IRr_1 + Ir_1 r_2 = \varepsilon_1 r_2 - IRr_2,$$

откуда следует

$$I = \frac{\varepsilon_2 r_1 + \varepsilon_1 r_2}{Rr_1 + r_1 r_2 + Rr_2} = 1\,\text{А}.$$

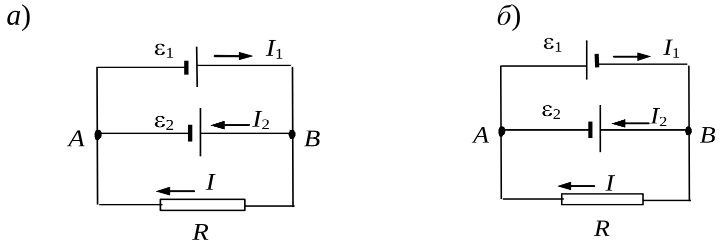


Рисунок 1

Если выбрать направление тока, противоположное тому, которое указано на рисунке 1, *а*, то согласно законам Кирхгофа для узлов и контуров будем иметь следующие уравнения:

$$I_2 + I = I_1; \quad -I_2 r_2 - IR = \varepsilon_2;$$

$$-\varepsilon_2 r_1 - IRr_1 - Ir_1 r_2 = \varepsilon_1 r_2 + IRr_2;$$

$$I = \frac{-\varepsilon_2 r_1 - \varepsilon_1 r_2}{Rr_1 + r_1 r_2 + Rr_2} = -1\,\text{А}.$$

Знак «минус» в ответе показывает, что действительное направление тока противоположно выбранному.

Если источники соединены так, как показано на рисунке 1, *б*, то для узла *A* можно записать

$$I_2 + I = I_1,$$

для контуров $\varepsilon_1 BRA\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2 BRA\varepsilon_2$

$$\begin{cases} I_1 r_1 - IR = \varepsilon_1; \\ -I_2 r_2 + IR = \varepsilon_2. \end{cases}$$

Совместное решение уравнений дает значение тока

$$I = \frac{-\varepsilon_2 r_1 + \varepsilon_1 r_2}{Rr_1 + r_1 r_2 + Rr_2} = 0 \text{ А}.$$

О т в е т: $I = 0$ А.

Пример 5.4 *Источник тока с ЭДС 12 В замкнут медным проводом длиной 5 м и диаметром поперечного сечения 0,2 мм. Сила тока в цепи равна 2 А. Найти внутреннее сопротивление источника и падение напряжения во внешней части цепи.*

Д а н о:
$\varepsilon = 12$ В,
$l = 5$ м,
$d = 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ м,
$I = 2$ А.

r, U – ?

Р е ш е н и е

Воспользуемся законом Ома для замкнутой цепи

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \tag{1}$$

где R – сопротивление нагрузки (в данном случае – медного провода);

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

где ρ – удельное сопротивление материала проволоки (в данном случае – меди); $S = \frac{\pi d^2}{4}$ – площадь сечения проволоки. Отсюда

$$R = \frac{4\rho l}{\pi d^2}. \tag{2}$$

Из формулы (1) получим

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

Подставим сюда соотношение (2):

$$r = \frac{\varepsilon}{I} - \frac{4\rho l}{\pi d^2}.$$

Проверим единицы измерения:

$$[r] = \frac{\text{В}}{\text{А}} - \frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \text{Ом}.$$

Подставив в формулу значения величин и произведя вычисления, получим

$$r = \frac{12}{2} - \frac{4 \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 5}{3{,}14 \cdot \left(2 \cdot 10^{-4}\right)^2} = 3{,}3\ \text{Ом}.$$

Падение напряжения на внешней части цепи определим по закону Ома для однородного участка цепи и формуле (2):

$$U = IR = \frac{4\rho l}{\pi d^2} I\ .$$

Проверим единицы измерения:

$$[U] = \frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{А}}{\text{м}^2} = \text{Ом} \cdot \text{А} = \text{В}.$$

Подставив в формулу значения величин и произведя вычисления, получим

$$U = \frac{4 \cdot 1{,}72 \cdot 10^{-8} \cdot 5}{3{,}14 \cdot \left(2 \cdot 10^{-4}\right)^2} \cdot 2 = 5{,}4\,\text{В}.$$

О т в е т: r = 3,3 Ом; U = 5,4 В.

Пример 5.5 *Электрическая лампа горит под напряжением 50 В и потребляет мощность 500 Вт. Определить, на сколько градусов нагреются подводящие провода через 1 мин после включения лампы, если проводка выполнена медным проводом сечением 1 мм^2 и половина выделившейся теплоты отдана окружающим телам.*

Д а н о:
U = 50 В,
P = 500 Вт,
τ = 1 мин,
S = 1 мм^2,
η = 0,5.

Δt – ?

Р е ш е н и е

Количество теплоты, выделившееся в проводах за время τ, определим по закону Джоуля − Ленца:

$$Q_1 = I^2 R\tau,$$

где I – сила тока через лампу, R – сопротивление проводов.

Количество теплоты, затраченной на нагревание проводника,

$$Q_2 = cm\Delta t,$$

где c – удельная теплоемкость; $m = \rho Sl$ – масса проводника; ρ – плотность меди; l – длина проводов.

По условию $Q_2 = \eta Q_1$, отсюда

$$cm\Delta t = \eta I^2 R\tau. \qquad (1)$$

Используем формулы для мощности тока и сопротивления цилиндрического проводника

$$I = \frac{P}{U}; \quad R = \rho_R \frac{l}{S},$$

где ρ_R – удельное сопротивление меди. Из этих соотношений и формулы (1) получим

$$\Delta t = \frac{\eta P^2 \rho_R \tau}{c\rho S^2 U^2}. \qquad (2)$$

Проверим единицы в соотношениях (2)

$$[\Delta t] = \text{Вт}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Дж}} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \frac{1}{\text{м}^4 \cdot \text{В}^2} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{А}} \frac{\text{Кл}}{\text{Дж}} = \frac{\text{К} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{с} \cdot \text{А}} = \text{К}.$$

Подставив в формулы значения величин и произведя вычисления, получим

$$\Delta t = \frac{0{,}5 \cdot (500)^2 1{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 60}{383 \cdot 8{,}93 \cdot 10^3 \cdot \left(10^{-6}\right)^2 \cdot 50^2} \approx 15 \text{ К} = 15 \text{ °C}.$$

О т в е т: $\Delta t = 15$ °C.

Пример 5.6 *Какой длины надо взять нихромовый проводник, имеющий сечение 0,1 мм^2, чтобы изготовить нагреватель, на котором можно за время 5 мин довести до кипения 1,5 л воды, взятой при температуре 20 °С? Напряжение в сети 220 В.* КПД *кипятильника 90 %.*

Дано:	Решение
S = 0,1 мм^2, τ = 5 мин, V = 1,5 л, U = 220 В, η = 90 %, ρ_R = 1,1 мкОм·м, t_1 = 20 ºС, t_2 = 100 ºС, ρ = 1 кг/м^3. l – ?	Масса воды $m = \rho V$. Для нагревания ей требуется сообщить количество теплоты $$Q = cm(t_2 - t_1) = c\rho V(t_2 - t_1),$$ где c – удельная теплоемкость. Расход энергии нагревателя по закону Джоуля − Ленца $$W = \frac{U^2}{R}\tau = \frac{Q}{\eta} = \frac{c\rho V(t_2 - t_1)}{\eta},$$ где $R = \rho_R l / S$ – сопротивление проволоки, из которой изготовлен нагреватель. Подставляя,

получим

$$\frac{U^2 \tau S}{\rho_R l} = \frac{c\rho V(t_2 - t_1)}{\eta}.$$

Отсюда искомая длина проводника

$$l = \frac{U^2 \tau S \eta}{\rho \rho_R c V(t_2 - t_1)}.$$

Проверим единицы в конечной формуле:

$$[l] = \frac{\text{В}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом} \cdot \text{м}} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \frac{\text{кг} \cdot \text{К}}{\text{Дж}} \frac{1}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} = \frac{\text{В}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{Дж}} \frac{\text{А}}{\text{В}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \frac{\text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{А}}{\text{Дж}} = \text{м} \frac{\text{с} \cdot \text{А}}{\text{с} \cdot \text{А}} = \text{м}.$$

Полученная размерность соответствует единицам измерения длины в системе СИ.

Подставим в формулу значения величин:

$$l = \frac{(220)^2 \cdot 300 \cdot 10^{-7} \cdot 0{,}9}{10^3 \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-6} \cdot 4{,}19 \cdot 10^3 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)} \approx 2{,}4\,\text{м}.$$

Ответ: l = 2,4 м.

Пример 5.7 *Определить плотность электрического тока в медном проводнике (ρ = 17 нОм·м), если удельная тепловая мощность тока w = 1,7 Дж/(м^3·с).*

Дано:
ρ = 17 нОм·м,
w = 1,7 Дж/(м^3·с).

j – ?

Решение

Согласно законам Джоуля – Ленца и Ома в дифференциальной форме

$$w = \gamma E^2 = E^2/\rho; \quad (1)$$

$$j = \gamma E = E/\rho, \quad (2)$$

где γ и ρ – соответственно удельные проводимость и сопротивление материала проводника. Из формулы (2) следует, что $E = \rho\, j$. Подставив это выражение в формулу (1) и подставив исходные значения, найдем искомую плотность тока:

$$j = \sqrt{w/\rho} = 10^4 \text{ А/м}^3.$$

Ответ: $j = 10^4$ А/м^3.

Пример 5.8 *Дуговая лампа горит под напряжением U = 50 В и потребляет мощность P = 500 Вт. Определить: а) на сколько градусов нагреются подводящие провода через τ = 1 мин после включения лампы, если проводка выполнена медным проводом сечением S = 1 мм^2 и половина выделившейся теплоты отдана окружающим телам; б) число электронов, проходящих через поперечное сечение провода за 1 с; в) среднюю скорость упорядоченного движения электронов, считая число электронов в проводнике равным числу атомов; г) силу, действующую на отдельные электроны проводимости.*

Дано:
U = 50 В,
P = 500 Вт,
τ = 1 мин,
S = 1 мм^2,
$\Delta\tau$ = 1 с.

Δt, $<\upsilon>$,
F – ?

Решение

Количество теплоты, выделившейся в проводах за время τ,

$$Q = I^2 R\tau,$$

и количество теплоты на нагревание проводника

$$Q = cm\Delta t,$$

связаны соотношением

$$cm\Delta t = \eta I^2 R\tau\,, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость; $m = \rho_М S_l$ – масса провода; $\rho_М$ – плотность меди; η – КПД.

Так как $I = P/U$ и $R = \rho l/S$, то из формулы (1) следует:

$$\Delta t = \frac{\eta P^2 \rho \tau}{c \rho_M S^2 U^2} \approx 3{,}8 \ {}^\circ C.$$

Число электронов, проходящих через поперечное сечение за одну секунду, определяется выражением

$$n = \frac{I}{e} = \frac{P}{Ue} = 6{,}25 \cdot 10^{19} \ \text{с}^{-1}.$$

Среднюю скорость упорядоченного движения электронов можно найти из выражения для плотности тока

$$\langle \upsilon \rangle = \frac{I}{q} = \frac{I}{e n_0 S} = \frac{P}{S U e n_0}, \qquad (2)$$

где q – заряд, прошедший через поперечное сечение проводника; $n_0 = \dfrac{N_A}{V_0} = \dfrac{N_A \rho_M}{A}$ – число свободных электронов в единице объема; A – атомная масса меди.

После преобразования выражения (2) и подстановки значений в полученную формулу имеем:

$$\langle \upsilon \rangle = \frac{PA}{e N_A \rho_M S U} = 3{,}74 \cdot 10^{-4} \ \text{м/с}.$$

Сила, действующая на отдельные электроны проводимости, находится из выражения

$$F = eE = e\frac{U}{l} = \frac{e \rho_M \rho}{SU} = 1{,}36 \cdot 10^{-20} \ \text{Н}.$$

О т в е т: $\Delta t = 38$ °С; $n = 6{,}25 \cdot 10^{19}$ с$^{-1}$; $\langle \upsilon \rangle = 3{,}74 \cdot 10^{-4}$ м/с;
$F = 1{,}36 \cdot 10^{-20}$ Н.

5.3 Задачи

5.1 Участок электрической цепи составлен из трех кусков провода одинаковой длины, изготовленных из одного и того же материала, соединенных последовательно. Сечения кусков провода соответственно равны 1, 2 и 3 мм^2. Разность потенциалов на концах участка $\Delta\varphi$ = 12 В. Найти разность потенциалов на каждом куске провода.

5.2 Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. ЭДС каждого элемента ε = 1,2 В, внутреннее сопротивление r = 0,2 Ом. Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление R = 1,5 Ом. Найти силу тока во внешней цепи.

5.3 Электровоз движется со скоростью υ = 54 км/ч и развивает среднюю силу тяги F = 68,6 кН. Определить силу потребляемого тока, если напряжение в линии U = 1,5 кВ, а КПД двигателя η = 92 %.

5.4 Найти длину медного провода, свернутого в бухту, не разматывая ее, если при соединении выведенных концов к источнику тока, ЭДС которого ε = 30 В, сила тока в цепи I = 6 А. Площадь поперечного сечения провода S = 1,5 см^2. Внутренним сопротивлением источника пренебречь.

5.5 Определить сопротивление мотка медной проволоки массой m = 0,3 кг, если площадь поперечного сечения проволоки S = 0,1 мм^2.

5.6 Во сколько раз добавочное сопротивление $R_{доб}$ должно быть больше сопротивления вольтметра $R_в$, чтобы этим вольтметром можно было измерить напряжение в 10 раз большее рассчитанного.

5.7 Как увеличить пределы измерения амперметра в 10 раз, если сопротивление амперметра равно R_0.

5.8 Зашунтированный амперметр измеряет ток силой до I = 10 А. Какую наибольшую силу тока I_{max} может измерить этот амперметр без шунта, если сопротивление амперметра R_0 = 0,02 Ом и сопротивление шунта $R_ш$ = 0,005 Ом?

5.9 Имеется миллиамперметр с сопротивлением R_0 = 9,9 Ом, предназначенный для измерения токов не более I_0 = 10 мА. Что нужно сделать для того, чтобы этим прибором измерять: 1) токи до I = 1 А; 2) напряжение до U = 1 В?

5.10 При внешнем сопротивлении R_1 = 8 Ом сила тока в цепи I = 0,8 А, при сопротивлении R_2 = 15 Ом сила тока I = 0,5 А. Определить силу тока короткого замыкания $I_{кз}$ источника ЭДС.

5.11 Резистор сопротивлением R_1 = 5 Ом, вольтметр и источник тока соединены параллельно. Вольтметр показывает напряжение U_1 = 10 В. Если заменить резистор другим сопротивлением R_2 = 12 Ом, то вольтметр покажет напряжение U_2 = 12 В. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока r. Током через вольтметр пренебречь.

5.12 Определить сопротивление алюминиевого стержня длиной $l = 1$ м, имеющего форму усеченного конуса с радиусами оснований $r_1 = 0{,}5$ см и $r_2 = 5$ см.

5.13 Амперметр сопротивлением $R_0 = 3$ Ом имеет предел изменения тока I от 0 до 25 мА. Какой длины надо взять манганиновую проволоку диаметром $d = 1$ мм для изготовления шунта к амперметру, чтобы расширить пределы его измерения до 2,5 А.

5.14 Имеется вольтметр, предназначенный для измерения разности потенциалов до $U_в = 30$ В с сопротивлением $R_в = 2$ кОм, шкала которого разделена на $n = 150$ делений. Какое сопротивление надо взять и как его включить, чтобы этим вольтметром можно было измерять разность потенциалов до $U = 15$ В?

5.15 Катушка и амперметр соединены последовательно и подключены к источнику тока. К клеммам катушки присоединен вольтметр с сопротивлением $r = 4$ кОм. Амперметр показывает силу тока $I = 1{,}3$ А, вольтметр – напряжение $U = 120$ В. Определить сопротивление R катушки. Определить относительную погрешность Δ, которая будет допущена при измерении сопротивления, если пренебречь силой тока, текущего через вольтметр.

5.16 ЭДС батареи $\varepsilon = 80$ В. Внутреннее сопротивление $R_1 = 5$ Ом. Внешняя цепь потребляет мощность $P = 100$ Вт. Определить силу тока I в цепи, напряжение U, под которым находится внешняя цепь, и ее сопротивление R.

5.17 Батарея, ЭДС которой $\varepsilon = 6$ В, а внутреннее сопротивление $r = 1{,}4$ Ом, питает внешнюю цепь, состоящую из двух параллельно соединенных проводников сопротивлениями $R_1 = 2$ Ом и $R_2 = 8$ Ом. Определить разность потенциалов на полюсах батареи и силу токов в проводниках.

5.18 Аккумуляторная батарея, замкнутая на реостат сопротивлением $R = 20$ Ом, создает в нем ток $I_1 = 1{,}170$ А. Если сопротивление реостата увеличить в $n = 3$ раза, то ток станет равным $I_2 = 0{,}397$ А. Определить ЭДС ε и внутреннее сопротивление r батареи, а также силу тока короткого замыкания $I_{кз}$.

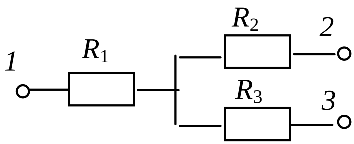
5.19 Имеются двенадцать элементов, ЭДС каждого из которых $\varepsilon = 1{,}5$ В и внутреннее сопротивление $r = 0{,}4$ Ом. Как нужно соединить эти элементы, чтобы получить от собранной из них батареи наибольшую силу тока во внешней цепи, сопротивление которой R = 0,3 Ом? Определить максимальную силу тока.

5.20 В электрический чайник налит 1 л воды, имеющей температуру t = 18 °С. Определить: 1) какую мощность P потребляет нагреватель чайника, если вода после включения закипает через τ = 5 мин; 2) каково сопротивление нагревателя R, если напряжение в сети U = 120 В? Потерями тепла пренебречь.

5.21 ЭДС источника тока ε = 12 В, сила тока короткого замыкания $I_{кз}$ = 40 А. Найти сопротивление R, которое необходимо подключить во внешнюю цепь, чтобы получить от источника силу тока I = 1 А.

5.22 Какой длины надо взять никелевую проволоку с площадью поперечного сечения S = 0,84 мм^2, чтобы изготовить нагреватель на 220 В, при помощи которого можно было бы нагреть 2 л воды от 20 °С до кипения за τ = 10 мин при КПД нагревателя η = 80 %?

5.23 Найти силу тока, протекающего через резистор с сопротивлением R_1 участка цепи, если сопротивление R_1 = 10 Ом, R_2 = 20 Ом, R_3 = 30 Ом и потенциалы точек 1, 2 и 3 равны соответственно φ_1 = 10 В, φ_2 = 13 В, φ_3 = 5 В.



5.24 В цепь включены последовательно медная и стальная проволоки равной длины и диаметра. Найти: 1) отношение количеств теплоты, выделяющейся в этих проволоках; 2) отношение напряжений на этих проволоках.

5.25 Электрический чайник, в который налито 0,6 л воды при t = 9 °С, сопротивление обмотки которого R = 16 Ом, забыли выключить. Напряжение в сети U = 120 В, КПД чайника η = 60 %. Через сколько времени τ после включения чайника вся вода выкипит?

5.26 Определить работу тока A на участке, не содержащем источника и имеющем сопротивление R = 12 Ом, если ток в течение τ = 5 с равномерно увеличился от I_1 = 2 А до I_2 = 10 А?

5.27 Два источника тока с различными ЭДС ε_1 и ε_2 и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 включены параллельно с резистором, электрическое сопротивление которого R. Какова сила тока I, текущего через этот резистор?

5.28 В медном проводнике объемом $V = 6$ см³ при прохождении по нему постоянного тока за время $t = 1$ мин выделилась теплота $Q = 2{,}15$ Дж. Вычислить напряженность E электрического поля в проводнике.

5.29 Какая мощность выделяется в единице объема проводника длиной $l = 0{,}2$ м, изготовленного из материала с удельным сопротивлением $\rho = 10^{-6}$ Ом·м, если на его концах поддерживается разность потенциалов $\Delta\varphi = 4$ В?

5.30 В проводнике за время $\tau = 10$ с при равномерном возрастании силы тока от $I_1 = 1$ А до $I_2 = 2$ А выделилось количество теплоты $Q = 5$ кДж. Найти сопротивление R проводника.

5.31 Сила тока в проводнике, имеющем сопротивление $R = 1$ кОм, изменяется со временем по закону $I = I_0 - e^{-at}$**,** где $I_0 = 20$ А, $\alpha = 10^2$ с$^{-1}$. Определить количество теплоты Q, выделившееся за время $\tau = 10^{-2}$с.

5.32 При силе тока $I = 0{,}3$ А во внешней цепи батареи аккумуляторов выделяется мощность $P_1 = 18$ Вт, при силе тока $I_2 = 1$ А – $P_2 = 10$ Вт. Определить ЭДС ε и внутреннее сопротивление r батареи.

5.33 Батарея состоит из пяти последовательно соединенных элементов. ЭДС каждого элемента $\varepsilon = 1{,}5$ В и внутреннее сопротивление $r = 0{,}3$ Ом. При какой нагрузке полезная мощность батареи будет максимальной? Какой при этом ток в нагрузке? Какую полную мощность дает в это время батарея?

5.34 Элемент, ЭДС которого $\varepsilon = 6$ В, дает максимальную силу тока $I_{\max} = 3$ А. Найти наибольшее количество теплоты $Q_{\max}$, которое может выделится во внешнем сопротивлении за $\tau = 1$ мин.

5.35 Найти внутреннее сопротивление генератора r, если известно, что мощность, выделяемая во внешней цепи, одинакова при двух значениях внешнего сопротивления $R_1 = 5$ Ом и $R_2 = 0{,}2$ Ом. Найти КПД η генератора в каждом из этих случаев.

5.36 Источник электрического тока, реостат и амперметр включены последовательно. Источник тока, ЭДС которого $\varepsilon = 2$ В, имеет внутреннее сопротивление $r = 0{,}4$ Ом. Амперметр показывает силу тока $I_a = 1$ А. С каким коэффициентом полезного действия η работает источник тока?

5.37 Батарея элементов, при замыкании на сопротивление $R = 5$ Ом дает ток силой $I = 1$ А; сила тока короткого замыкания $I_{кз} = 6$ А.

Определить наибольшую полезную мощность, которую может дать батарея.

5.38 Батарея, ЭДС которой $\varepsilon = 12$ В, может дать наибольшую силу тока $I_{\max} = 5$ А. Какая наибольшая мощность P может выделиться на подключенном к батарее резисторе с переменным сопротивлением?

5.39 Электрический чайник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в чайнике закипает через $\tau_1 = 15$ мин, при включении другой – через $\tau_2 = 30$ мин. Через сколько времени закипит вода в чайнике, если включить обе обмотки: 1) последовательно; 2) параллельно?

5.40 Источник постоянного тока, ЭДС которого $\varepsilon = 120$ В и внутреннее сопротивление $r = 5$ Ом, включен в цепь. Определить: 1) какую наибольшую мощность может развить источник во внешней части цепи; 2) при каком сопротивлении внешней части цепи это происходит; 3) чему равен КПД η источника в этом случае?

5.41 Какой заряд q приобрел бы медный шар радиусом $R = 10$ см, если бы удалось удалить все электроны проводимости? Считать, что на каждый атом меди приходится один электрон проводимости.

5.42 Определить плотность тока j в железном проводе длиной $l = 20$ м, если провод находится под напряжением $U = 12$ В.

5.43 Как изменяется сопротивление железного провода длиной $l = 100$ км и площадью поперечного сечения $S = 10$ мм^2, если температура воздуха колеблется от $t_1 = -30$ °С (зимой) до $t_2 = 30$ °С?

5.44 Определить температурный коэффициент сопротивления провода α, составленного из алюминиевой проволоки с сопротивлением $R_1 = 3$ Ом и железной проволоки с $R_2 = 2$ Ом, соединенных последовательно.

5.45 При измерении температуры применяли железную проволоку. При $T_1 = 10$ °С ее сопротивление $R_1 = 13{,}7$ Ом. При некоторой другой температуре T_2 сопротивление $R_2 = 18{,}2$ Ом. Определить эту температуру.

5.46 Определить температуру T вольфрамовой нити накала лампочки в рабочем состоянии, если при включении ее в электрическую сеть напряжением $U = 220$ В установится ток $I = 0{,}68$ А. При $t = 20$ °С сопротивление нити $R = 36$ Ом.

5.47 Реостат, изготовленный из железной проволоки, миллиамперметр и источник ЭДС включены последовательно. При температуре 0 °С сопротивление реостата $R_р = 200$ Ом, а сопротивление миллиамперметра $R_а$ = 20 Ом. Миллиамперметр показывает значение силы тока $I_а$ = 30 мА. Каким будет показание миллиамперметра, если реостат нагреется до t = 50 °С? Внутренним сопротивлением источника тока пренебречь.

5.48 Плотность тока в медном проводнике j = 3 А/мм^2. Какова напряженность электрического поля в проводнике?

5.49 В металлическом проводнике сечением S = 4 мм^2 сила тока I = 0,8 А. Принимая, что в каждом кубическом сантиметре металла содержится $n = 2{,}5\cdot 10^{22}$ свободных электронов, определить среднюю скорость их упорядоченного движения.

5.50 Плотность тока в алюминиевом проводе j = 1 А/мм^2. Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов, предполагая, что число свободных электронов в одном кубическом метре алюминия равно числу атомов.

6 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ И ГАЗАХ

6.1 Основные законы и формулы

Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

$$j = qn\left(u_+ + u_-\right)E,$$

где q – заряд иона; n – концентрация ионов; u_+, u_- – подвижность положительных и отрицательных ионов.

Плотность тока насыщения в газе между плоскими электродами

$$j_н = qn_0 d,$$

где q – заряд иона; d – расстояние между электродами; n_0 – число пар ионов, создаваемых ионизатором в единице объема газа в единицу времени: $n_0 = N/(Vt)$; N – общее число ионов; V – объем газа; t – время.

Плотность тока насыщения при термоэлектронной эмиссии (удельная эмиссия) определяется *формулой Ричардсона – Дэшмана*:

$$j_н = BT^2 \exp\left(-A/kT\right),$$

где B – эмиссионная постоянная; T – термодинамическая температура; A – работа выхода электрона из металла; k – постоянная Больцмана.

6.2 Примеры решения задач

Пример 6.1 *Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объем $V = 375$ см^3 и заполнено частично ионизированным водородом. Площадь пластин конденсатора $S = 250$ см^2. При каком напряжении U между пластинами конденсатора сила тока I, протекающего через конденсатор, достигнет значения 2 мкА, если концентрация ионов обоих знаков в газе $C = 5{,}3\cdot10^{7}$ см$^{-3}$? Подвижность ионов $u_+ = 5{,}4\cdot10^{-4}$ м^2/(В·с), $u_- = 7{,}4\cdot10^{-4}$ м^2/(В·с).*

Дано:
$V = 375$ см^3,
$S = 250$ см^2,
$I = 2$ мкА,
$u_+ = 5{,}4\cdot10^{-4}$ м^2/(В·с),
$u_- = 7{,}4\cdot10^{-4}$ м^2/(В·с),
$C = 5{,}3\cdot10^{7}$ см$^{-3}$.
U – ?

Решение

Напряжение на пластинах конденсатора связано с напряженностью электрического поля между пластинами и расстоянием между ними соотношением

$$U = Ed. \tag{1}$$

Напряженность поля может быть найдена из выражения плотности тока:

$$j = qn\left(u_+ + u_-\right)E\,,$$

где q – заряд иона. Отсюда следует

$$E = \frac{j}{qn\left(u_+ + u_-\right)} = \frac{I}{qn\left(u_+ + u_-\right)S}\,.$$

Расстояние между пластинами, входящее в формулу (1), найдем из соотношения $d = V/S$.

Подставив выражения E и d в формулу (1), получим

$$U = \frac{IV}{qn\left(u_+ + u_-\right)S^2}\,. \tag{2}$$

Подставив в формулу (2) значения исходных величин и произведя вычисления, найдем $U = 110$ В.

Ответ: $U = 110$ В.

6.3 Задачи

6.1 Азот ионизируется рентгеновскими лучами. Определить проводимость азота, если в каждом кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия $n = 10^7$ пар ионов.

6.2 Объем некоторого газа, заключенного между электродами ионизационной камеры, $V = 0{,}5$ л. Газ ионизируется рентгеновскими лучами. Сила тока насыщения $I_{нас} = 4$ нА. Заряд каждого иона равен элементарному заряду. Сколько пар ионов образуется за одну секунду в одном кубическом сантиметре газа?

6.3 Найти силу тока насыщения между пластинами конденсатора, если под действием ионизатора в каждом кубическом сантиметре пространства между пластинами конденсатора образуется $n_0 = 10^8$ пар ионов, каждый из которых несет один элементарный заряд. Расстояние между пластинами конденсатора $d = 1$ см, площадь пластины $S = 100$ см^2.

6.4 Напряженность электрического поля у поверхности Земли $E = 130$ В/м. Это создает ток силой $I = 4{,}78$ мкА через поверхность $S = 10^6$ м^2. Считая ионы однозарядными, оценить концентрацию ионов каждого знака в атмосфере воздуха.

6.5 В ионизационной камере (расстояние между плоскими электродами $d = 5$ см) проходит ток насыщения плотностью $j = 16$ мкА/м^2. Определить число пар ионов, образующихся в каждом кубическом сантиметре пространства камеры за одну секунду.

6.6 Найти число пар ионов, образующихся в газе при нормальных условиях в одном кубическом сантиметре за одну секунду между пластинами плоского конденсатора площадью $S = 250$ см^2 каждая, если при расстоянии между пластинами $d = 5$ см сила тока насыщения $j_{нас} = 10^{-15}$ А.

6.7 Средняя напряженность электрического поля Земли $E = 130$ В/м. Определить плотность тока проводимости в атмосфере, если в одном кубическом метре воздуха находится $n = 7 \cdot 10^8$ м$^{-3}$ ионов проводимости.

6.8 Сила тока в вольфрамовой нити накаливания $I = 0{,}2$ А, диаметр нити $d = 0{,}02$ мм, температура нити при работе лампы $t = 2000$ °С. Определить напряженность E электрического поля в нити лампы.

6.9 Какую скорость направленного движения имеют свободные электроны внутри медного проводника длиной $l = 1$ м, на концах которого поддерживается разность потенциалов $\varphi = 0{,}01$ В?

6.10 Определить работу выхода электронов из металла, если при повышении температуры от $T = 2000$ К на $\Delta T = 0{,}01$ К ток насыщения термоэлектронной эмиссии возрастает на 0,01 %.

6.11 Определить минимальную скорость электрона, необходимую для ионизации атома водорода, если потенциал ионизации атома водорода $U_i = 13{,}6$ В.

6.12 Отношение работ выхода электронов из платины и цезия $A_{Pt}/A_{Cs} = 1{,}58$. Определить отношение минимальных скоростей теплового движения электронов, вылетающих из этих металлов.

6.13 Работа выхода электрона из металла $A = 2{,}5$ эВ. Определить скорость вылетающего из металла электрона, если он обладает энергией $W = 10^{-18}$ Дж.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Электрическое поле в вакууме. Электрические свойства тел. Элементарный заряд. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона. Электрическое поле и его напряженность. Поток вектора напряженности. Теорема Остроградского – Гаусса и ее применение для вычисления напряженности поля заряженных тел.

Потенциал электрического поля. Работа сил электрического поля по перемещению электрических зарядов. Потенциал поля. Потенциал поля точечного заряда. Связь между напряженностью электрического поля и потенциалом. Потенциал поля заряженных тел различной формы.

Проводники в электрическом поле. Распределение зарядов в проводниках. Электроемкость проводника. Конденсаторы. Электроемкость конденсатора. Соединение конденсаторов в батареи. Энергия системы точечных электрических зарядов. Энергия заряженного проводника и заряженного конденсатора. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии поля.

Электрическое поле в диэлектриках. Свободные и связанные заряды. Электрический диполь в однородном электрическом поле. Типы диэлектриков. Поляризация диэлектриков. Вектор поляризации. Электрическое смещение. Теорема Остроградского –Гаусса для электрического поля в веществе.

Постоянный электрический ток. Условия существования тока. Сила тока. Плотность тока. Закон Ома в дифференциальной и интегральной формах. Сопротивление проводника. Соединение проводников. Электродвижущая сила. Напряжение. Законы Кирхгофа для разветвленных цепей. Работа и мощность тока. Закон Джоуля – Ленца. Объяснение законов Ома и Джоуля – Ленца на основе элементарной классической теории электропроводности металлов.

Электрический ток в вакууме и газах. Ионизация. Несамостоятельный и самостоятельный газовые разряды. Искровой, тлеющий, коронный и дуговой разряды. Газоразрядная плазма. Термоэлектронная эмиссия и ее практическое применение. Работа выхода электрона. Электрический ток в вакууме.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие / Т. И. Трофимова. – 14-е изд., стер. – М. : Академия, 2007. – 560 с.

2 **Детлаф, А. А.** Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 608 с.

3 Физика для втузов / И. И. Наркевич и [др.]. – Минск : Выш. шк., 1994. – Т. 1 – 426 с.; Т. 2 – 554 с.

4 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – 11-е изд., перераб. – М. : Наука, 1985. – 381 с.

5 **Чертов, А. Г.** Физические величины: Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 334 с.

6 **Трофимова, Т. И.** Курс физики. Задачи и решения : учеб. пособие / Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. – 4-е изд., испр. – М. : Академия, 2011. – 592 с.

7 **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука, 1990. – 624 с.

8 **Савельев, И. В.** Сборник задач и вопросов по общей физике / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1988. – 288 с.

9 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике : учеб. пособие / И. Е. Иродов. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1988. – 416 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(*справочное*)

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

1 Некоторые физические постоянные (округленные значения)

Скорость света в вакууме	$c = 3\cdot10^{8}$ м/с
Гравитационная постоянная	$G = 6{,}67\cdot10^{-11}$ Н·м^2·кг$^{-2}$
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9{,}81$ м/с^2
Постоянная Авогадро	$N_A = 6{,}02\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8{,}31$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К
Объем 1 моля газа при нормальных условиях	$V_\mu = 22{,}4\cdot10^{-3}$ м^3/моль
Элементарный электрический заряд	$q = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9{,}1\cdot10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1{,}67\cdot10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}$ Гн/м
Магнетон Бора	$\mu_Б = 9{,}27\cdot10^{-24}$ Дж/Тл
Постоянная Планка	$h = 6{,}63\cdot10^{-34}$ Дж·с

2 Плотность твердых тел и жидкостей

Вещество	ρ, 10^3 кг/м^3	Вещество	ρ, 10^3 г/м^3
Алюминий	2,71	Вода (при 4 °С)	1
Железо	7,80	Глицерин	1,26
Медь	8,93	Дизельное топливо	1
Свинец	11,3	Масло трансформаторное	0,9
Серебро	10,5	Керосин	0,8
Эбонит	1,2	Масло касторовое	0,9
Магний	1,74	Спирт	0,83

3 Диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

Диэлектрик	ε
Масло (трансформаторное)	2,2
Масло (касторовое)	4,8
Керосин	2,0
Спирт	26
Парафин	2,0
Слюда	7,5
Стекло	7,0
Фарфор	5,0
Оргстекло (плексиглас)	3,5
Глицерин	3,9
Резина, каучук	2,5
Эбонит	2,7
Полиэтилен	2,3

4 Удельное сопротивление ρ_0 (при 20 °C) и температурный коэффициент α проводников

Вещество	ρ_0, 10^{-8} Ом·м	α, 10^{-4} °C^{-1}
Серебро	1,66	40
Алюминий	3,21	38
Медь	1,7	42,8
Железо	12	62
Вольфрам	5,5	51
Свинец	20,8	43
Нихром	100	4
Манганин	44,5	0,5
Никелин	40	2,3
Графит	390	–8

5 Подвижность ионов газов (при нормальных условиях)

Газ	Подвижность, 10^{-4} м^2/(В·с)		Газ	Подвижность, 10^{-4} м^2/(В·с)	
	u_+	u_-		u_+	u_-
Водород	1,3	1,8	Кислород	1,3	1,8
Воздух	5,4	7,4	Углекислый газ	1,0	1,1
Азот	1,4	1,9	Хлор	0,6	0,5

6 Магнитные восприимчивости пара- и диамагнетиков

Парамагнетики	χ, 10^{-6}	Диамагнетики	χ, 10^{-6}
Азот	0,013	Водород	–0,063
Алюминий	23	Бензол	–7,5
Воздух	0,38	Висмут	–176
Вольфрам	176	Вода	–9
Жидкий кислород	3400	Каменная соль	–12,6
Кислород	1,9	Кварц	–15,1
Марганец	121	Медь	–10,3
Платина	360	Стекло	–12,3

7 Единицы электрических и магнитных величин

Наименование величины и ее условное обозначение	Название единицы измерения в СИ и ее сокращенное обозначение
Электрический заряд q	кулон, Кл
Линейная плотность заряда τ	кулон на метр, Кл/м
Поверхностная плотность заряда σ	кулон на квадратный метр, Кл/м^2
Объемная плотность заряда	кулон на кубический метр, Кл/м^3

Наименование величины и ее условное обозначение	Название единицы измерения в СИ и ее сокращенное обозначение
Электрический момент p	кулон-метр, Кл·м
Напряженность электрического	ньютон на кулон, Н/Кл
поля E	вольт на метр, В/м
Поток напряженности Φ_E	вольт-метр, В·м
Потенциал поля φ	вольт, В
Напряжение U	вольт, В
ЭДС ε	вольт, В
Сила тока I	ампер, А
Плотность тока j	ампер на квадратный метр, А/м^2
Электрическая емкость C	фарад, Ф
Поляризованность P	кулон на квадратный метр, Кл/м^2
Диэлектрическая восприимчивостьχ	Величина безразмерная
Диэлектрическая проницаемость ε	
Электрическое сопротивление R	Величина безразмерная
Удельное сопротивление ρ	ом, Ом
Удельная проводимость γ	ом-метр, Ом·м
Магнитная индукция B	сименс, См
Напряженность магнитного поля H	тесла, Тл
Магнитный момент p_m	ампер на метр, А/м
	ампер-квадратный метр,
Магнитный поток Φ_B	А·м^2
Индуктивность L	вебер, Вб
Намагниченность J	генри, Гн
Магнитная восприимчивость χ	ампер на метр, А/м
Магнитная проницаемость μ	Величина безразмерная
	Величина безразмерная

8 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

Приставка			Приставка		
Обозначение	Наименование	Множитель	Обозначение	Наименование	Множитель
Э	экса	10^{18}	д	деци	10^{-1}
П	пэта	10^{15}	с	санти	10^{-2}
Т	тера	10^{12}	м	милли	10^{-3}
Г	гига	10^{9}	мк	микро	10^{-6}
М	мега	10^{6}	н	нано	10^{-9}
к	кило	10^{3}	п	пико	10^{-12}
г	гекта	10^{2}	ф	фемто	10^{-15}
да	дека	10^{1}	а	атто	10^{-18}

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(справочное)

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Одним из основных условий успешного освоения курса физики во втузе является систематическое и самостоятельное решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить законы и формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

Курс физики втузов делится на шесть разделов. Изучение каждого раздела сопровождается выполнением одной контрольной работы, проводимой аудиторно в устной или письменной форме по усмотрению преподавателя.

Изучение студентом курса физики состоит из следующих основных этапов: прослушивание курса лекций, самостоятельное изучение физики по учебным пособиям, решение задач, выполнение контрольных и лабораторных работ, сдача зачетов и экзаменов.

Курс физики следует изучать систематически в течение всего учебного процесса. Освоение курса физики в сжатые сроки перед экзаменом не дает глубоких и прочных знаний.

Студент не должен ограничиваться только запоминанием физических формул. Он должен осмыслить их и уметь самостоятельно вывести.

К выполнению контрольных работ по каждому разделу курса общей физики студент приступает только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы. При этом необходимо пользоваться учебными пособиями и конспектами лекций, ответить на вопросы для самоконтроля и внимательно ознакомиться с примерами решения задач, предназначенных для самостоятельного решения, приведенных в пособиях по каждому разделу курса.

Решение задач по физике включает следующие этапы.

1 Выбор основных законов и формул, которые описывают рассматриваемые явления и процессы, повторение их формулировок и физического смысла буквенных обозначений.

2 Вывод формул, которые являются частным случаем, не выражают физические законы или не дают определения каких-нибудь физических величин.

3 Построение схематического чертежа (рисунка), поясняющего рассматриваемые процессы.

4 Получение в общем (буквенном) виде конечных расчетных формул (т. е. формул, при подстановке в которые исходных данных задачи получаются искомые величины).

5 Проверка конечных формул (проверка размерностей): подстановка в них вместо обозначений физических величин их единиц СИ; доказательство того, что после соответствующих математических действий формулы дают верные единицы искомых величин.

6 Подстановка в окончательные формулы, которые получены в результате решения задачи в общем виде, числовых значений, выраженных в единицах одной системы (СИ), и расчет искомых величин. При этом следует руководствоваться правилами приближенных вычислений и, при необходимости, использовать степенное представление чисел.

7 Оценка физической правдоподобности полученных результатов.

8 Запись в ответе числовых значений и единиц искомых величин в СИ.

Для успешного освоения материала и качественной подготовки к контрольной работе рекомендуется выполнение самостоятельной работы по решению задач в рамках СУРС. Для этого преподаватель задает по 8 задач из изучаемого раздела физики. Варианты задач выдаются преподавателем в начале каждого учебного семестра.

ПРИЛОЖЕНИЕ В
(обязательное)

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ

1 Каждая самостоятельная работа должна выполняться в отдельной тетради. На обложке обязательно следует указать номер и вариант самостоятельной работы, фамилию, имя, отчество, группу и факультет, дату сдачи работы. Решение каждой задачи должно начинаться с нового листа. Следует указать номер задачи (в соответствии с пособием), без сокращений записать ее полное условие, и далее привести ее краткое условие. Для замечаний преподавателя на страницах тетради необходимо оставить поля (3–4 см). В каждой самостоятельной работе должны быть решены все 8 задач.

2 Решение задачи необходимо представить в общем виде и довести его до конечных расчетных формул. Вычисления промежуточных величин и дальнейшая подстановка полученных чисел допускается только в случае необходимости многократного их использования в задаче.

3 Решение должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями, которые включают конкретные однозначные объяснения использованных буквенных обозначений. Например, вместо «...υ_1 – скорость», следует писать «... υ_1 – мгновенная скорость первого тела до удара относительно системы отсчета, связанной с Землей» и т. п. В ходе решения задачи нельзя изменять обозначения и индексы для величин, приведенных в кратком условии (при этом их смысл можно не пояснять). Следует приводить физические (опирающиеся на законы физики и условия их выполнения) обоснования использованных уравнений. Например, «Так как рассматриваемая система тел является замкнутой, то на основании закона сохранения импульса можно записать уравнение ...» и т. п.

4 Полученные расчетные формулы обязательно следует проверить, т. е. в каждую из них вместо значений физических величин подставить их единицы в СИ и убедиться, что получающаяся по этой формуле единица соответствует искомой физической величине (см. примеры решения задач). При этом нельзя пользоваться таблицами,

выражающими именованные единицы (1Вт, 1 Гн и т. п.) через основные, а необходимо проводить преобразования единиц с помощью физических формул и определяющих уравнений для физических величин. Вычисления необходимо проводить в СИ. При этом следует пользоваться правилами приближенных вычислений. Точность полученных результатов не должна превышать точности исходных данных, в том числе и табличных (как правило, достаточно двух-трех значащих цифр). Следует показать, какие числа были подставлены в расчетные формулы. В конце задачи необходимо записать ответ(ы), при этом для больших (>1000) или малых (<0,001) чисел следует применять степенную форму или множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц, например, 1500 м = 1,5 км; 0,000015 с = 15 мкс.

5 Выполненные работы должны быть в указанный срок представлены на рецензирование. Если прорецензированная работа не зачтена, то в той же тетради нужно исправить ошибки, выполнить все требования преподавателя и в кратчайший срок сдать работу на повторное рецензирование. Работу над ошибками следует выполнять на оставшейся после первоначального решения задачи части листа (при этом должно быть понятно, где начинаются исправления). При отсутствии места для исправлений работу над ошибками можно выполнять в конце тетради или подклеить дополнительный лист. Исправления внутри первоначального текста решения задачи не допускаются! Окончательный вариант самостоятельной работы предоставляется к контрольной работе.

6 Студент допускается к экзаменационной сессии только при условии выполнения всех контрольных работ.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Электрическое поле в вакууме 3
1.1 Основные законы и формулы 3
1.2 Примеры решения задач 6
1.3 Задачи 14
2 Потенциал электрического поля 22
2.1 Основные законы и формулы 22
2.2 Примеры решения задач 24
2.3 Задачи 31
3 Электрическое поле в веществе 35
3.1 Основные законы и формулы 35
3.2 Примеры решения задач 37
3.3 Задачи 39
4 Проводники в электростатическом поле 43
4.1 Основные законы и формулы 43
4.2 Примеры решения задач 44
4.3 Задачи 51
5 Постоянный электрический ток 58
5.1 Основные законы и формулы 58
5.2 Примеры решения задач 61
5.3 Задачи 70
6 Электрический ток в вакууме и газах 76
6.1 Основные законы и формулы 76
6.2 Примеры решения задач 77
6.3 Задачи 78
Вопросы для изучения теоретического материала 79
Список рекомендуемой литературы 81
Приложение А. Справочные таблицы 82
Приложение Б. Общие указания 87
Приложение В. Рекомендации по оформлению самостоятельных работ 89

Учебное издание

ПАВЛЕНКО Александр Петрович
ПИНЧУК Ростислав Григорьевич
ПРОНЕВИЧ Игорь Иванович

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Пособие

Редактор *Я. В. Войтеховская*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 30.12.2021 г. Формат 60×84 $^{1}/_{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 4,09. Тираж 300 экз.
Зак. № 3172. Изд. № 71

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11. 2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель