МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики

М. В. БУЙ, И. В. ПРИХОДЬКО,
А. П. ПАВЛЕНКО

ФИЗИКА

Часть 3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Учебно-методическое пособие для студентов инженерно-технических специальностей ФБО

Гомель 2009

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики

М. В. БУЙ, И. В. ПРИХОДЬКО,
А. П. ПАВЛЕНКО

Ф И З И К А

Часть 3

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Учебно-методическое пособие для студентов
инженерно-технических специальностей ФБО

Одобрено методической комиссией факультета безотрывного обучения

Гомель 2009

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3
Б90

Р е ц е н з е н т – д-р техн. наук, профессор *О. В. Холодилов* (УО «БелГУТ»).

Буй, М.В.

Б90 Физика : учеб.-метод. пособие для студентов инженерно- технических специальностей ФБО. В 6 ч. Ч. 3: Электричество / М.В. Буй, И.В. Приходько, А.П. Павленко. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 99 с.

ISBN 978-985-468-561-8 (ч.3)

Приведены общие методические указания, разделы программы, основная и дополнительная литература, основные сведения из теории, примеры решения задач, задания для контрольных работ и справочные таблицы по разделам “Электростатика, электрический ток” программы курса физики для инженерно-технических специальностей втузов.

Предназначено для методического обеспечения самостоятельной работы по физике студентов инженерно-технических специальностей безотрывной формы обучения.

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3

ISBN 978-985-468-561-8 (ч.3)
ISBN 978-985-468-558-8

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Курс физики втузов делится на шесть разделов. Изучение каждого раздела сопровождается выполнением одной контрольной работы из восьми задач. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем на установочной сессии.

Изучение курса физики студентом безотрывной формы обучения состоит из следующих основных этапов: самостоятельного изучения физики по учебной литературе, решения задач, выполнения контрольных работ и их защиты преподавателю, выполнения лабораторных работ, сдачи зачетов и экзаменов.

Самостоятельная работа по учебной литературе

Самостоятельная работа по учебно-методическим пособиям является главным видом учебной работы студента безотрывной формы обучения. При этом необходимо руководствоваться следующим:

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

2 Избрав какое-нибудь учебно-методическое пособие в качестве основного, студент должен придерживаться его при изучении всего курса или, по крайней мере, целого раздела. Замена одного пособия другим в процессе изучения ведет к утрате логической связи между отдельными вопросами. Если же основное пособие не дает полного ответа на отдельные вопросы программы, необходимо обратиться и к другим учебно-методическим пособиям.

3 Работа над учебной литературе сопровождается составлением конспекта, в котором записываются формулировки законов и выражающие их формулы, определения физических величин и единиц их измерения, выполняются чертежи и решаются типовые задачи.

4 Изучая курс физики, студент встречается с большим количеством единиц измерения, которые объединены в Международную систему единиц (СИ). Студент должен помнить, что без основательного знания систем единиц, без умения пользоваться ими при решении физических задач невозможно усвоить курс физики и, тем более, применять физические знания на практике.

5 Всю работу по овладению курсом физики студент должен подвергать систематическому самоконтролю с помощью вопросов, которые приводятся в данном учебно-методическом пособии.

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

Решение задач

Необходимым условием успешного изучения курса общей физики является систематическое решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить в памяти студента формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

Решая задачи, необходимо выполнить следующее:

1 Выбрать основные законы и формулы, которые используются при решении задачи, разъяснить буквенные обозначения, употребляемые при написании формул.

Если для решения задачи нужна формула, которая является частным случаем, не выражает физический закон или не является определением какой-нибудь физической величины, ее следует вывести.

2 При необходимости сделать чертеж или рисунок, поясняющий содержание задачи. Выполнить его нужно аккуратно при помощи чертежных принадлежностей.

3 Решение задачи должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями.

4 Все величины, входящие в условие задачи, необходимо выразить в единицах СИ.

5 Решить задачу в общем (буквенном) виде – получить конечную расчетную формулу . Проверить правильность полученной формулы. Для этого подставить в правую часть формулы вместо обозначений величин наименования их единиц и проверить, получается ли в результате единица искомой величины. Верно полученная рабочая формула должна давать правильную размерность искомой величины.

6 В окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, подставить числовые значения, выраженные в единицах одной системы (СИ).

7 Произвести вычисления величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений. Точность результатов не должна превышать точности исходных данных, в том числе и табличных. При необходимости представлять результат в виде степенной функции.

8 Оценить правдоподобность полученного результата.

9 Записать в ответе числовое значение и размерность единицы измерения искомой величины в системе СИ.

В отдельных случаях при решении громоздких задач целесообразно производить вычисления промежуточных величин.

Выполнение контрольных работ

По каждому разделу курса общей физики студент-заочник приступает к выполнению контрольных работ только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с примерами решения задач и задач, предназначенных для самостоятельного решения, приведенных в этом пособии по каждому разделу курса.

Студенту при выполнении контрольных работ необходимо руководствоваться следующим:

1 Контрольные работы от первой до последней выполняются только по условиям задач данного пособия. Замена какой-либо контрольной работы другой, взятой из аналогичного пособия, не допускается.

2 Контрольные работы выполняются в тонкой школьной тетради, на лицевой стороне которой приводятся сведения по следующему образцу:

Кафедра физики Контрольная работа № ___ по физике студента ___ курса Иванова Ивана Ивановича Учебный шифр № ___ 246028, г. Гомель, ул. Кожара, д. 27, кв. 15

3 Выполнять контрольные работы следует чернилами или шари-

ковой ручкой. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставляют поля.

4 Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Вначале указывается номер задачи в соответствии с пособием. Условия задач переписываются полностью, без сокращений. Далее следует условие задачи в кратком виде и решение задачи.

5 Все решаемые задачи сопровождаются краткими, но исчерпывающими пояснениями, раскрывающими физический смысл употребляемых формул, и с обязательным выполнением основных правил решения задач.

6 В конце каждой контрольной работы студент-заочник должен указать название учебника или учебного пособия, которым он пользовался, автора и год издания, чтобы рецензент в случае необходимости мог конкретно указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

7 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 дополнительные листы. Исправления внутри первоначального текста решения задачи не допускаются!

В случае невыполнения перечисленных требований контрольные работы рецензироваться не будут!

8 На повторное рецензирование исправленные задачи представляются вместе с незачтенной работой.

9 Студент должен быть готов при защите контрольной работы дать пояснения по существу решения входящих в нее задач.

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

ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РАЗДЕЛАМ ПРОГРАММЫ

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. 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. 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.

Ионизация. Несамостоятельный и самостоятельный газовые разряды. Искровой, тлеющий, коронный и дуговой разряды и их применение. Газоразрядная плазма.

Термоэлектронная эмиссия и ее практическое применение. Работа выхода электрона. Электрический ток в вакууме.

Рекомендуемая литература

Основная

1 **Савельев, И.В.** Курс общей физики. В 3 т. / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т.2. – 496 с.

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

3 **Трофимова, Т.И.** Курс физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1990. – 478 с.

4 **Трофимова, Т.И.** Сборник задач по курсу физики / Т.И. Трофимова. – М. : Высшая школа, 1991. – 303 с.

5 **Чертов, А.Г.** Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьёв. – М. : Высшая школа, 1988. – 526 с.

Дополнительная

6 **Волькенштейн, В.С**. Сборник задач по общему курсу физики / В.С. Волькенштейн. – М. : Наука, 1985. – 381 с.

7 **Калашников, С.Г.** Электричество / С.Г. Калашников. – М. : Высшая школа, 1964. – 668 с.

8 **Матвеев, А.Н.** Электричество и магнетизм / А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1983. – 463 с.

9 **Иродов, И.Е.** Задачи по общей физике / И.Е. Иродов. – М. : Наука, 1988. – 416 с.

10 **Савельев, И.В.** Сборник задач и вопросов по общей физике / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1988. – 288 с.

11 **Чертов, А.Г.** Физические величины / А.Г. Чертов. – М. : Высшая школа, 1990. – 315 с.

12 **Сена, Л.И.** Единицы физических величин и их размерности / Л.И. Сена. – М. : Наука, 1988. – 432 с.

13 Физика : задания к практическим занятиям / под ред. Ж.П. Лагутиной. – Минск : Вышэйшая школа, 1989. – 236 с.

14 Сборник задач по физике / под ред. М.С. Цедрика. – Минск : Вышэйшая школа, 1976. – 320 с.

15 **Фирганг, Е.В.** Руководство к решению задач по курсу общей физики / Е.В. Фирганг. – М. : Высшая школа, 1977. – 351 с.

16 **Кухлинг, Х.** Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М. : Мир,

1985. – 520 с.

17 **Детлаф, А.А.** Справочник по физике / Б.М. Яворский,

18 **Зильберман, Г.Е.** Электричество и магнетизм / Г.Е. Зильберман. – М. : Наука, 1970. – 384 с.

19 **Новодворская, Е.М.** Методика проведения упражнений по физике во втузе / Е.М. Новодворская, Э.М. Дмитриев. – М. : Высшая школа, 1981. – 318 с.

20 Сборник задач по общему курсу физики / под ред. А.Н. Куценко и Ю.В. Рублева. – М. : Высшая школа, 1972. – 432 с.

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 – сила электрического взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2; $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды; r – расстояние между зарядами.

Закон сохранения электрического заряда

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

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

Напряжённость электрического поля

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

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

Поток вектора напряжённости электрического поля:

а) через произвольную поверхность, помещённую в неоднородное поле,

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

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

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

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

Поток вектора напряжённости электрического поля через замкнутую поверхность S

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

где интегрирование ведётся по всей поверхности.

Теорема Остроградского–Гаусса для электростатического поля в вакууме. Поток вектора напряжённости через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую электрические заряды q_1, q_2, q_n,

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

где $\sum\limits_{i=1}^{n} q_i$ – алгебраическая сумма зарядов, заключённых внутри этой замкнутой поверхности; n – число зарядов.

Напряжённость поля, создаваемого точечным зарядом q на расстоянии r от заряда,

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

Напряжённость 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) электрических полей, согласно которому напряжённость результирующего поля, созданного двумя и более источниками поля, равна векторной сумме напряжённостей складываемых полей:

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

В случае двух электрических полей с напряжённостями $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ модуль вектора напряжённости

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

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

Поверхностная плотность заряда

$$\sigma = \frac{dq}{dS}.$$

Напряжённость поля, создаваемого бесконечной равномерно заряженной плоскостью,

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

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

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

Линейная плотность τ заряда есть величина, равная отношению заряда, распределённого по нити, к длине нити (цилиндра):

$$\tau = \frac{dq}{d\ell}.$$

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

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

Напряжённость поля, создаваемого объемно заряженным шаром,

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{Q}{r^2} \quad (r\geq R);\quad E=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{Q}{R^3}r' \qquad (r\leq R).$$

Циркуляция вектора напряжённости электрического поля есть величина, численно равная работе по перемещению единичного точечного положительного заряда вдоль любого замкнутого контура. Циркуляция выражается интегралом и в случае электростатического поля равна нулю:

$$\oint_L \vec{E}\,d\vec{\ell}=\oint_L E_\ell\,d\ell=0,$$

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

Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению потенциальной энергии точечного положительного заряда, помещённого в данную точку поля, к этому заряду:

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

Потенциал электрического поля есть величина, равная отношению работы силы по перемещению точечного положительного заряда из данной точки в бесконечность к величине этого заряда:

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

Потенциал электрического поля в бесконечности от источника 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 той точке, где находится заряд q_i, всеми зарядами, кроме i-го.

Связь между напряжённостью и потенциалом электростатического поля

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

В случае электрического поля, обладающего центральной или сферической симметрией, эта связь выражается формулой

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

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

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

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,

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

где E_ℓ – проекция вектора напряжённости на направление перемещения; $d\ell$ – модуль перемещения.

В случае однородного поля формула для работы принимает вид

$$A = qE\ell\cos\alpha,$$

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

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 $\vec{\ell}$, проведённый от отрицательного заряда диполя к его положительному заряду, называется плечом диполя.

Электрический момент диполя

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

Напряжённость и потенциал поля диполя в точке, лежащей на оси диполя,

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

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

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

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

Механический момент, действующий на диполь в однородном электрическом поле,

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

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

Вектор поляризации или поляризованность

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

где $\vec{p}_i$ – электрический момент i-й молекулы; N – число молекул, содержащихся в объёме ΔV.

Связь поляризованности с напряжённостью поля в диэлектрике

$$P = \chi\varepsilon_0 E,$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью

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

Напряжённость среднего макроскопического поля в диэлектрике связана с напряжённостью E_0 внешнего поля соотношениями:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} \quad \text{или} \quad E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0}.$$

Электрическое смещение связано с напряжённостью поля соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{E}.$$

Теорема Остроградского–Гаусса для электростатического поля в веществе. Поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность, охватывающую заряды 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, заключённых внутри замкнутой поверхности; n – число зарядов.

Электрическая ёмкость уединённого проводника или конденсатора

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

где Δq – заряд, сообщённый проводнику (конденсатору); $\Delta\varphi$ – изменение потенциала, вызванное этим зарядом.

Емкость уединённой проводящей сферы радиусом R, находящейся в среде с диэлектрической проницаемостью ε,

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

Электрическая ёмкость плоского конденсатора

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

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

Электрическая ёмкость цилиндрического конденсатора

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

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

Электрическая ёмкость 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 $$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+...+\frac{1}{C_n};$$

б) в случае двух конденсаторов $$C=\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}.$$

Емкость батареи конденсаторов при параллельном соединении

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

Сила притяжения пластин конденсатора

$$F=\frac{\varepsilon_0\varepsilon SU^2}{2d^2}=\frac{\varepsilon_0\varepsilon SE^2}{2d^2}=\frac{q^2S}{2\varepsilon_0\varepsilon}.$$

Энергия заряженного конденсатора

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

Энергия электростатического поля плоского конденсатора

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

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

Объёмная плотность энергии

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

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

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,

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

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

Плотность тока в проводнике

$$\vec{j} = nq\langle\vec{v}\rangle,$$

где n – концентрация носителей заряда; $\langle\vec{v}\rangle$ – 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

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R};$$

в) для замкнутой цепи

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

где $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов на концах участка цепи; $\mathcal{E}_{12}$ – ЭДС источников тока, входящих в участок; $R_о$ – сопротивление цепи (участка цепи), $R_о = R + r$; R – внешнее сопротивление; r – внутреннее сопротивление источника тока; $\mathcal{E}$ – ЭДС всех источников тока цепи.

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

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

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

Сопротивление однородного проводника

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

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

Зависимость удельного сопротивления от температуры

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

где ρ_0 и ρ – удельные сопротивления, соответственно, при 0 ^{0}С и при температуре t (по шкале Цельсия); α – температурный коэффициент сопротивления.

Сопротивление проводников при последовательном и параллельном соединениях

$$R = \sum_{i=1}^{n} R_i \qquad \text{и} \qquad \frac{1}{R} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i},$$

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

Правила Кирхгофа для разветвлённых 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:

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

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

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

$$A = I U t.$$

Мощность тока

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

Закон Джоуля–Ленца определяется соотношением:

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

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

Закон Джоуля–Ленца в дифференциальной форме

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

где w – удельная тепловая мощность тока, т.е. количество теплоты, выделяемое в единицу времени в единице объема проводника при протекании в нем тока.

Закон Видемана–Франца

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

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

Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

$$j = q\,n\,(u_+ + u_-)E,$$

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

Плотность тока насыщения в газе между плоскими электродами

$$j_{\text{н}} = q\,\Delta n\,d,$$

где q – заряд иона; Δn – число пар ионов, создаваемых ионизатором в единицу времени в единице объёма газа, $\Delta n = N/(Vt)$; d – расстояние между электродами.

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

$$j_{\text{н}} = BT^2\exp\left(-\frac{A}{kT}\right),$$

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

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 3

Пример 1. *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 трёх зарядов, например q_1 (рисунок 1).

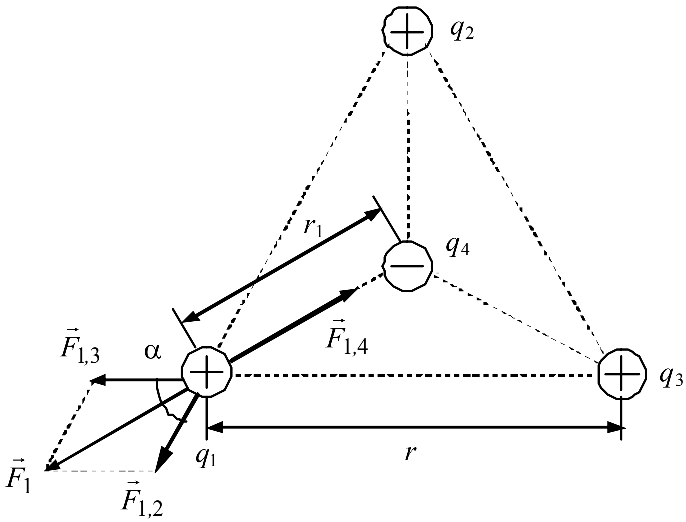

Рисунок 1

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

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

где $\vec{F}_{1,i}$ – сила, действующая на заряд q_1 со стороны заряда q_i; $\vec{F}_1$ – векторная сумма сил $\vec{F}_{1,3}$ и $\vec{F}_{1,2}$.

Перейдя к модулям сил, получим $F_1 - F_{1,4} = 0$. Выразив F_1 через $F_{1,2}$ и

$F_{1,3}$ и учитывая, что $F_{1,2} = F_{1,3}$, получим: $F_{1,4} = F_{1,2}\sqrt{2(1+\cos 60°)}$.

Применив закон Кулона и имея в виду, что $q_1 = q_2 = q_3$, запишем:

$$k\frac{q_1 q_4}{\varepsilon r_1^2} = k\frac{q_1^2}{\varepsilon r^2}\sqrt{2(1+\cos 60°)},$$

откуда следует соотношение для искомого заряда

$$q_4 = q_1\frac{r_1^2}{r^2}\sqrt{2(1+\cos 60°)}.$$

Из геометрических построений в равностороннем треугольнике следует:

$$r_1 = \frac{r}{2\cos 30^0} = \frac{r}{\sqrt{3}}.$$

С учётом этого получим

$$q_4 = \frac{\sqrt{2\left(1+\frac{1}{2}\right)}}{3}q_1 = \frac{q_4}{\sqrt{3}} = \frac{1}{1{,}73} = 0{,}58 \text{ нКл.}$$

О т в е т: $q_4 = 0{,}58$ нКл.

Пример 2. *Тонкий прямой стержень длиной 15 см равномерно заряжен с линейной плотностью заряда 0,1 мКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии 10 см от ближайшего конца находится точечный заряд q_0 = 10 нКл. Определить силу взаимодействия стержня и заряда.*

Д а н о:	Р е ш е н и е
l = 15 см, τ = 0,1 мКл/м, a = 10 см, q_0 = 10 нКл F – ?	Здесь нельзя определить силу взаимодействия зарядов непосредственно по закону Кулона, т.к. заряд, распределённый по стержню, нельзя считать точечным. Чтобы применить закон Кулона, рассмотрим бесконечно малый элемент длины dx стержня, находящийся на расстоянии x от заряда q_0 (рисунок 2). За-

ряд этого элемента $dq = \tau\, dx$.

По закону Кулона на заряд q_0 со стороны заряда dq будет действовать сила

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

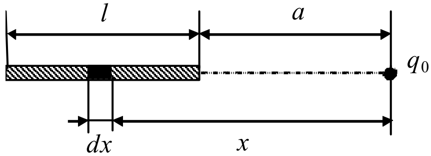

Рисунок 2

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, найдём искомую силу, равную результирующей силе действия всех элементов стержня на заряд q_0:

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

Вынеся постоянные множители за знак интеграла, получим

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

Проверим, дает ли конечная формула единицу силы. Для этого в ее правую часть вместо символов величин подставим обозначения их единиц и используем для их преобразования определения физических величин:

$$[F] = \frac{\text{м}}{\text{Ф}} \cdot \text{Кл} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{м}} \cdot \frac{1}{\text{м}} = \frac{\text{В}}{\text{Кл}} \cdot \frac{\text{Кл}^2}{\text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{м}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}} = \text{Н}.$$

Произведем вычисления, предварительно переведя все значения единиц в систему СИ:

$$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{Ф}}{\text{м}},\ \text{q}_0 = 10^{-8}\,\text{Кл},\ \tau = 10^{-4}\ \frac{\text{Кл}}{\text{м}},\ \text{a} = 0{,}1\ \text{м},\ l = 0{,}15\,\text{м}.$$

$$F = \frac{1}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}} \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-4}\left(\frac{1}{0{,}1} - \frac{1}{0{,}1 + 0{,}15}\right) \approx 5 \cdot 10^{-5}\,\text{Н}.$$

О т в е т: $F = 5 \cdot 10^{-5}$ Н.

Пример 3. *Расстояние между двумя точечными зарядами 2 нКл и –3 нКл, расположенными в вакууме, равно 20 см. Определить напряженность и потенциал поля, создаваемого этими зарядами в точке, удаленной от первого заряда на расстояние 15 см и от второго заряда на 10 см.*

Дано:	Решение
q_1 = 2 нКл, q_2 = – 3 нКл, l = 20 см, r_1 = 15 см, r_2 = 10 см, $\varepsilon = 1$	Согласно принципу суперпозиции $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$, где $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ – напряженности электрических полей в рассматриваемой точке, которые создавались бы каждым из зарядов при отсутствии других (направления векторов показаны на рисунке 3).
E – ? φ – ?	Модули напряженностей электрических полей, создаваемых в вакууме точечными зарядами q_1 и q_2,

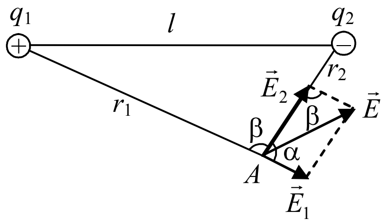

Рисунок 3

$$E_1 = \frac{|q_1|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1^2},\ E_2 = \frac{|q_2|}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2^2}. \quad (1)$$

Модуль вектора $\vec{E}$ найдем по формуле, которая следует из теоремы косинусов (для используемого при сложении векторов параллелограмма $\cos\alpha = -\cos\beta$):

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\alpha}. \quad (2)$$

По теореме косинусов для треугольника q_1Aq_2

$$l^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2\cos\beta,$$

откуда следует, что $\cos\alpha = \dfrac{l^2 - r_1^2 - r_2^2}{2r_1r_2}$.

Удобнее отдельно рассчитать эту величину, чтобы не загромождать конечную формулу:

$$\cos\alpha = \frac{(0{,}2)^2 - (0{,}15)^2 - (0{,}1)^2}{2\cdot 0{,}15\cdot 0{,}1} = 0{,}25.$$

Подставив (1) в формулу (2), получим искомую напряженность:

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

Согласно принципу суперпозиции потенциал результирующего поля $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, где $\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_1}$ и $\varphi_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2}$ – потенциалы электрических полей в рассматриваемой точке, которые создавались бы каждым из зарядов при отсутствии других. Отсюда следует:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0}\left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2}\right).$$

Конечные формулы по структуре совпадают с аналогичными формулами для напряженности и потенциала точечного заряда, поэтому проверку единиц для них можно не проводить.

Произведем вычисления, предварительно переведя все значения единиц в систему СИ:

$$E = 9\cdot 10^9\sqrt{\frac{\left(2\cdot 10^{-9}\right)^2}{(0{,}15)^4} + \frac{\left(3\cdot 10^{-9}\right)^2}{(0{,}1)^4} + \frac{2\cdot 2\cdot 10^{-9}\cdot 3\cdot 10^{-9}}{(0{,}15)^2(0{,}1)^2}\cdot 0{,}25} = 1{,}35\cdot 10^{-6}\ \text{Н};$$

$$\varphi = \frac{1}{4\cdot 3{,}14\cdot 1\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}}\left(\frac{2\cdot 10^{-9}}{0{,}15} + \frac{-3\cdot 10^{-9}}{0{,}1}\right) = -150\ \text{В}.$$

О т в е т: $F = 1{,}35\cdot 10^{-6}$ Н; $E = 3$ кВ/м; $\varphi = -150$ В.

Пример 4. *Найти напряжённость и потенциал в центре полукольца радиусом $R = 5$ см, по которому равномерно распределён заряд $q = 3\cdot 10^{-9}$ Кл.*

Р е ш е н и е

Д а н о:
$R = 5$ см,
$q = 3$ нКл,
$\varepsilon = 1$
E – ?
φ – ?

Физическую систему составляют: равномерно заряженное зарядом q полукольцо и электрическое поле этого заряда. Для определения модуля напряжённости E и потенциала φ в центре полукольца воспользуемся принципом суперпозиции. Разделим полукольцо на малые элементы дуги dl так, чтобы заряд $dq = \tau dl = qdl/(\pi R)$

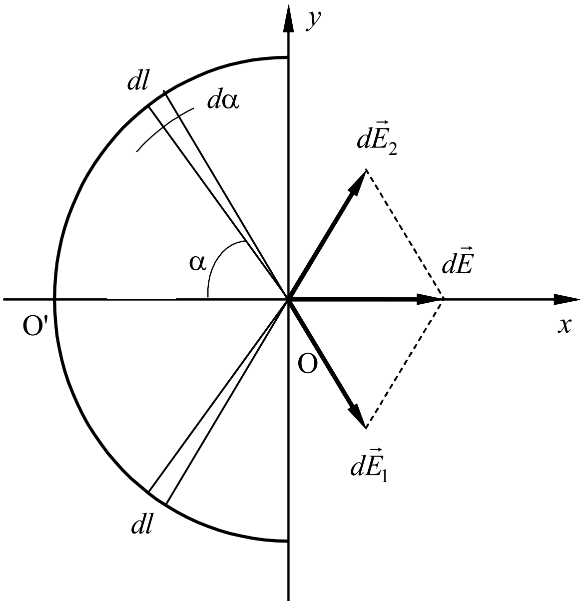

Рисунок 4

каждого такого элемента дуги можно было считать точечным. Выберем два произвольных симметрично расположенных относительно оси Оx элемента дуги dl (рисунок 4).

Напряжённость электростатического поля в точке О, создаваемого выбранными элементами dl, согласно принципу суперпозиции,

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

где $d\vec{E}_1$ и $d\vec{E}_2$ – напряженности полей, которые создавал бы каждый из выбранных элементов по отдельности.

Из соображений симметрии следует, что алгебраическая сумма проекций напряжённостей полей выбранных элементов на ось Оy равна нулю, поэтому напряженность результирующего поля направлена вдоль оси Оx:

$$dE = 2dE_{1x} = 2dE_1\cos\alpha = 2\frac{dq\cos\alpha}{4\pi\varepsilon_0 R^2} = \frac{q\cos\alpha}{2\pi^2\varepsilon_0 R^3}dl.$$

Так как $dl = Rd\alpha$, то $dE = \dfrac{q\cos\alpha}{2\pi^2\varepsilon_0 R^2}d\alpha.$

Положение точечного заряда dq на полукольце определяется углом α, поэтому его и выберем в качестве переменной интегрирования:

$$E = E_x = \frac{q}{2\pi^2\varepsilon_0 R^2}\int_{-0}^{\frac{\pi}{2}}\cos\alpha d\alpha = \frac{q}{2\pi^2\varepsilon_0 R^2}.$$

Потенциал в центре полукольца определяется алгебраической суммой потенциалов электрического поля $d\varphi$ элементарных зарядов (согласно принципу суперпозиции). Учитывая, что для точечного заряда в вакууме потенциал $d\varphi = dq/4\pi\varepsilon_0 R$, определяем φ:

$$\varphi = \int_0^{\pi R} d\varphi = \frac{q}{4\pi^2\varepsilon_0 R^2}\int_0^{\pi R} dl = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

Конечные формулы по структуре совпадают с аналогичными формулами для напряженности и потенциала точечного заряда, поэтому проверку единиц для них можно не проводить.

Произведем вычисления, предварительно переведя все значения единиц в систему СИ:

$$E = \frac{3\cdot 10^9}{2\cdot(3{,}14)^2\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot(0{,}05)^2} = 6{,}88\cdot 10^3\ \frac{\text{В}}{\text{м}};$$

$$\varphi = \frac{3\cdot 10^9}{2\cdot 3{,}14\cdot 8{,}85\cdot 10^{-12}\cdot 0{,}05} = 539\ \text{В}.$$

О т в е т: $E = 6{,}88\cdot 10^3$ В/м, $\varphi = 539$ В.

Пример 5. *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.*

Д а н о:
$v_1 = 1$ Мм/с,
$v_2 = 5$ Мм/с
U – ?

Р е ш е н и е

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):

$$A = T_2 - T_1 = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

Приравняв оба выражения, получим ускоряющую разность потенциалов:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2e}.$$

Произведем проверку единиц, аналогично примеру 2:

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

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 6. *Определить начальную скорость v_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.*

Д а н о:

$r_{min} = 10^{-11}$ см,
$m = 1{,}67\cdot10^{-27}$ кг,
$q = 1{,}6\cdot10^{-19}$ Кл

v_0 – ?

Р е ш е н и е

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 v_1 каждой частицы равны половине искомой скорости, т. е. $v_1 = v_0/2$.

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

$$E = T + П,$$

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

В начальном состоянии протоны находились на достаточно большом расстоянии друг от друга, поэтому их начальной потенциальной энергией можно пренебречь ($П_1 = 0$).

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:

$$T_1 = \frac{m v_1^2}{2} + \frac{m v_2^2}{2} = m v_1^2 = \frac{m v_0^2}{4}. \tag{4}$$

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

$$\frac{m v_0^2}{4} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_{\min}}, \text{ откуда } v_0 = \frac{e}{\sqrt{\pi\varepsilon_0 m r_{\min}}}.$$

Произведем проверку единиц:

$$[v_0]=\frac{\text{Кл}}{\sqrt{\frac{\text{Ф}}{\text{м}}\text{кг}\cdot\text{м}}}=\sqrt{\frac{\text{Кл}^2\cdot\text{В}}{\text{кг}\cdot\text{Кл}}}=\sqrt{\frac{\text{Кл}}{\text{кг}}\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}}=\sqrt{\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{кг}}}=\sqrt{\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}^2}\frac{\text{м}}{\text{кг}}}=\sqrt{\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}=\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выполним вычисления по полученной формуле:

$$v_0=\frac{1{,}6\cdot10^{-19}}{\sqrt{3{,}14\cdot8{,}85\cdot10^{-12}\cdot1{,}67\cdot10^{-27}\cdot10^{-13}}}=2{,}35\cdot10^{6}\,\frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

О т в е т: v_0 = 2,35 Мм/с.

Пример 7. *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:

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

Потенциалы точек начала и конца пути выразятся формулами:

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0 r_1}, \quad \varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_2}.$$

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:

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

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.

Расчет емкости и энергии заряженного конденсатора

При расчете емкости и энергии плоского заряженного конденсатора особое значение имеют задачи, в которых рассматривается изменение энергии вследствие, например, удаления диэлектрика или раздвижения обкладок конденсатора. При этом, если конденсатор отключается от источника тока до проведения указанных действий, то заряд на его обкладках изменяться не будет и энергия конденсатора может меняться только за счет работы приложенных внешних сил. Поэтому возрастание энергии конденсатора однозначно соответствует положительной работе внешних сил.

Во втором случае, когда конденсатор не отключается от источника, на обкладках поддерживается постоянное напряжение. В этом случае изменение энергии конденсатора будет определяться работой внешних сил и работой сторонних сил источника по изменению заряда конденсатора.

Пример 8. *Между обкладками плоского конденсатора, заряженного до разности потенциалов 1,5 кВ, зажата пластинка толщиной 5 мм из парафина (ε = 2). Определить поверхностную плотность связанных зарядов на парафине.*

Д а н о:
U= 1,5 кВ,
d = 5 мм,
ε = 2
σ′ – ?

Р е ш е н и е

Векторы электрического смещения $\vec{D}$ и напряжённости $\vec{E}$ электрического поля связаны между собой соотношением

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P},$$

где $\vec{P}$ – вектор поляризованности диэлектрика. Так как векторы $\vec{D}$ и $\vec{E}$ нормальны к поверхности диэлектрика, то $D_n = D$ и $E_n = E$. Тогда можно записать

$$D = \varepsilon_0 E + P,$$

где $P = \sigma'$, т.е. поляризованность в данном случае равна (по модулю) поверхностной плотности связанных зарядов диэлектрика. Отсюда следует:

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

Учитывая, что $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$ и $E = U/d$, найдём

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

Произведем проверку единиц:

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

Выполним вычисления по полученной формуле:

$$\text{у}' = 8{,}85\cdot10^{-12}\cdot(2-1)\cdot\frac{1{,}5\cdot10^3}{5\cdot10^{-3}} = 2{,}65\cdot10^{-6}\,\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

О т в е т: σ′ = 2,65 мкКл/м^2.

Пример 9. *Диполь с электрическим моментом p = 2 нКл·м находится в однородном электростатическом поле напряженностью*

E = 30 кВ/м. Вектор $\vec{p}$ составляет угол $\alpha_0 = 60^\circ$ с направлением силовых линий поля. Определить произведенную внешними силами работу A для поворота диполя на угол $\beta = 30^\circ$.

Д а н о:

p = 2 нКл·м,
E = 30 кВ/м,
$\alpha_0 = 60^\circ$,
$\beta = 30^\circ$

A – ?

Р е ш е н и е

Из исходного положения (рисунок 5, *а*) диполь можно повернуть на угол $\beta = 30^0 = \pi/6$ двумя способами: по часовой стрелке (рисунок 5, *б*) до угла

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

или против часовой стрелки (рисунок 5, *в*) до угла

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

В первом случае диполь будет поворачиваться под действием сил поля. Если кинетическая энергия диполя не меняется (общепринятое предположение), то из теоремы об ее изменении следует, что суммарная работа всех сил, т. е. сил поля и внешних сил, равна нулю. Поэтому работа внешних сил при этом отрицательна и по модулю равна работе сил поля. Во втором случае поворот может быть произведен только под действием внешних сил и, следовательно, работа внешних сил при этом положительна (а работа сил поля – отрицательна).

Работу, совершаемую электрическими силами при повороте диполя, можно вычислить интегрированием выражения элементарной работы, которая при повороте диполя на угол $d\alpha$ определяется по формуле

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

где M – проекция момента электрических сил, действующих на диполь, на ось вращения (при выборе положительного угла α_0 ось направлена на читателя).

Так как проекция момента сил равна:

$$M = -pE\sin\alpha,$$

тогда элементарная работа будет определяться выражением

$$dA' = -pE\sin\alpha\, d\alpha.$$

а) *б*) *в*)

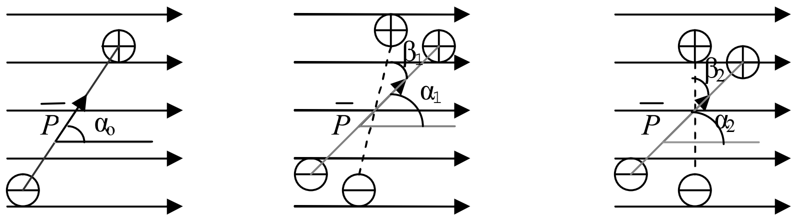

Рисунок 5

Полная работа при повороте на угол от α_0 до α определяется выражением

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

После интегрирования, с учетом вышесказанного, получим

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

Произведем проверку единиц:

$$[A] = \text{Кл}\cdot\text{м}\frac{\text{В}}{\text{м}} = \text{Кл}\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{Дж}.$$

С учетом исходных данных для работы внешних сил при повороте диполя по часовой стрелке будем иметь:

$$\alpha = \pi/6;\ A_1 = 2\cdot10^{-9}\cdot3\cdot10^{4}\cdot(0{,}5 - 0{,}866) = -2{,}19\cdot10^{-5}\,\text{Дж}$$

против часовой стрелки:

$$\alpha = \pi/2;\ A_1 = 2\cdot10^{-9}\cdot3\cdot10^{4}\cdot(0{,}5 - 0) = 3\cdot10^{-5}\,\text{Дж}$$

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

Пример 10. *К пластинам плоского воздушного ($\varepsilon_1 = 1{,}0$) конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 1{,}5$ кВ. Площадь пластины $S = 150$ см^2, расстояние между ними $d = 5$ мм. После отключения конденсатора от источника напряжения в пространство между пластинами внесли стекло ($\varepsilon_2 = 7{,}0$). 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:	Решение
U_1=1,5 кВ =1,5·10^3 В, S_1=150 см^2 = 1,5·10^{-2}м^2, ε_1 = 1,0, ε_2 = 7,0, d = 5 мм = 5·10^{-3}м	Так как конденсатор отключили от источника до замены диэлектрика, то заряд обкладки, а значит, и поверхностная плотность заряда на обкладке остаются постоянными:
U_2, C_1, C_2, σ_1, σ_2 – ?	$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma,$$

где σ – введенное обозначение.

Напряженность электрического поля в плоском конденсаторе может быть определена из двух выражений:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{U}{d},$$

поэтому до внесения диэлектрика и после его внесения справедливы соотношения

$$\sigma d = U_1 \varepsilon_0 \varepsilon_1 \quad \text{и} \quad \sigma d = U_2 \varepsilon_0 \varepsilon_2,$$

из которых следует:

$$U_2 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} U_1.$$

Емкость конденсатора до и после включения диэлектрика определяется соответственно выражениями:

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

Заряд пластин после отключения от источника напряжения не меняется, т. е. Q = const. Поэтому поверхностную плотность заряда на пластинах до и после внесения диэлектрика можно найти по одной из следующих формул:

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

Из четырех конечных формул только последняя нуждается в проверке получающихся единиц:

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

Подставим в полученные соотношения исходные значения и проведем вычисления:

$$U_2 = \frac{1}{7} \cdot 1{,}5 \cdot 10^3 = 214\,\text{В};\ C_1 = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 2{,}65 \cdot 10^{-11}\,\Phi;$$

$$C_2 = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 1{,}86 \cdot 10^{-10}\,\Phi;\ \sigma = \frac{2{,}65 \cdot 10^{-11} \cdot 1{,}5 \cdot 10^3}{1{,}5 \cdot 10^{-2}} = 2{,}65 \cdot 10^{-6}\,\frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

О т в е т: $U_2 = 214$ В; $C_1 = 26{,}5$ пФ; $C_2 = 186$ пФ; $\sigma = 2{,}65$ мкКл/м^2.

Пример 11. *Определить электрическую емкость плоского конденсатора с двумя слоями диэлектриков: фарфор толщиной 2 мм ($\varepsilon_1 = 5{,}0$) и эбонит толщиной 1,5 мм ($\varepsilon_2 = 2{,}7$), если площадь каждой пластины равна 100 см^2*.

Д а н о:
$d_1 = 2$ мм,
$\varepsilon_1 = 5{,}0$,
$d_2 = 1{,}5$ мм,
$\varepsilon_2 = 2{,}7$,
$S = 100$ см^2
C – ?

Р е ш е н и е

Емкость конденсатора, по определению, $C = Q/U$, где Q – модуль заряда на одной из пластин конденсатора, U – разность потенциалов между пластинами.

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

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

Заряд пластины выразим через его поверхностную плотность (σ), а разности потенциалов − через напряженности электрических полей в диэлектриках (E_1 и E_2) и электрическое смещение (D) в веществах, которое одинаково, т. к. векторы полей перпендикулярны к поверхностям диэлектриков:

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

С учетом вышеприведенных формул равенство (1) можно переписать в виде

$$C = \frac{\sigma S}{\dfrac{Dd_1}{\varepsilon_0\varepsilon_1} + \dfrac{Dd_2}{\varepsilon_0\varepsilon_1}}, \tag{2}$$

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:

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

Подставим числовые значения величин в формулу (3):

$$C = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 10^{-2}}{\dfrac{2 \cdot 10^{-3}}{5} + \dfrac{1{,}5 \cdot 10^{-3}}{267}} = 9{,}22 \cdot 10^{-11}\,\text{Ф}.$$

О т в е т: $C = 92{,}2$ пФ.

Пример 12. *Конденсатор емкостью 3 мкФ заряжен до напряжения 300 В, а конденсатор емкостью 2 мкФ − до 200 В. Определить напряжение между пластинами конденсатора после соединения их: а) одноименно заряженными пластинами; б) разноименно заряженными пластинами. Какое количество теплоты выделится в результате соединения конденсаторов в первом случае?*

Д а н о:
$C_1 = 3$ мкФ,
$U_1 = 300$ В,
$C_2 = 2$ мкФ,
$U_2 = 200$ В,
$S = 100$ см^2
U, U', Q – ?

Р е ш е н и е

Конденсаторы соединены параллельно; емкость эквивалентного конденсатора $C = C_1 + C_2$. При соединении одноименно заряженных пластин из закона сохранения заряда следует, что заряд эквивалентного конденсатора

$$q = q_1 + q_2,$$

где q_1 и q_2 – заряды конденсаторов до соединения.

Отсюда и из определения емкости следует:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2}.$$

Учитывая по определению емкости, 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 аналогично напряжение между ними:

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

Единицы в последних двух формулах очевидны.

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

$$W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2}; \quad W_2 = \frac{CU^2}{2} = \left(\frac{C_1 + C_2}{2}\right) U^2.$$

Следовательно, искомое количество теплоты

$$Q = W_1 - W_2 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2} - \left(\frac{C_1 + C_2}{2}\right) U^2.$$

Слагаемые в последней формуле по структуре совпадают с известным соотношением для энергии заряженного конденсатора, поэтому проверка единиц не требуется. Вычислим результат:

$$Q = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 300^2}{2} + \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2}{2} - \left(\frac{3 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6}}{2}\right) \cdot 260^2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

О т в е т: а) U = 260 В; б) U' = 100 В; Q = 6 мДж.

Пример 13. *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 по формуле

$$\Delta W = W_1 - W_2, \qquad (1)$$

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

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

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

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

где U – разность потенциалов на зажимах батареи конденсаторов.

Заряд после присоединения второго конденсатора остался прежним $Q = C_1 U_1$, поэтому из определения электроемкости следует:

$$U = \frac{Q}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1}{C_1 + C_2}. \qquad (3)$$

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 алгебраических преобразований найдем:

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

По структуре конечная формула совпадает с известным соотношением для энергии конденсатора, поэтому проверка единиц здесь не требуется.

Подставим в эту формулу исходные данные и выполним вычисления:

$$\Delta W = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot \left(3 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}\right)} \cdot 40^2 = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\,\text{Дж}.$$

О т в е т : $\Delta W = 1{,}5$ мДж.

Пример 14. *Плоский конденсатор заряжен до разности потенциалов $U = 1$ кВ. Расстояние между пластинами $d = 1$ см. Диэлектрик – стекло. Определить объемную плотность энергии поля конденсатора.*

Д а н о:
$U = 1$ кВ,
$d = 0{,}01$ м
w – ?

Р е ш е н и е

Объемная плотность энергии однородного электрического поля

$$w = \frac{W}{V}, \tag{1}$$

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

Энергия заряженного конденсатора определяется по формуле

$$W = \frac{CU^2}{2}, \tag{2}$$

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

Для плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}; \quad V = Sd ,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость (для стекла $\varepsilon = 7$); S – площадь пластины конденсатора.

Подставим эти соотношения в (2), а получившуюся формулу – в (1):

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

Проверим размерность полученной формулы:

$$[w] = \frac{\text{Ф}}{\text{м}} \frac{\text{В}^2}{\text{м}^2} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} \frac{\text{В}^2}{\text{м}^3} = \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3} \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}.$$

Подставим в формулу (3) исходные данные и выполним вычисления:

$$w = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot (1000)^2}{2 \cdot (0{,}01)^2} \approx 0{,}31 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}.$$

Ответ: $w = 0{,}31$ Дж/м^3.

Пример 15. *Плоский воздушный конденсатор с площадью обкладок $S = 200$ см^2 каждая и расстоянием между ними $d = 5$ мм заряжается до разности потенциалов $U_0 = 600$ В и 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^2,
$d_0 = 5$ мм,
$U_0 = 600$ В,
$l = 2$ мм
ΔC, ΔW – ?

Решение

Для воздушного плоского конденсатора начальная емкость

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0}.$$

Результат внесения незаряженной металлической пластины в пространство между обкладками не зависит от ее конкретного расположения, т. к. она не создает своего электрического поля. Поэтому предположим, что пластина вплотную прижата к одной из обкладок. Это эквивалентно уменьшению расстояния между обкладками до $d = d_0 - l$, что вызовет увеличение емкости конденсатора до величины:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d} = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 - l}.$$

Искомое изменение емкости:

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d_0 - l} - \frac{\varepsilon_0 S}{d_0} = \frac{\varepsilon_0 S l}{(d_0 - l) d_0}.$$

Изменение энергии конденсатора может быть рассчитано двумя способами:

1 Поскольку конденсатор отключен от батареи, заряд на его обкладках остается постоянным и равным $Q = C_0 U_0$. Для расчета энергии конденсатора удобно воспользоваться формулой

$$W = \frac{Q^2}{2C}.$$

Отсюда изменение энергии конденсатора при изменении емкости будет задаваться выражением

$$\Delta W = \frac{Q^2}{2}\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_0}\right) = -\frac{Q^2}{2}\frac{d_0}{\varepsilon_0 S} = -\frac{\varepsilon_0 S U_0^2 l}{2 d_0^2}. \qquad (1)$$

2 Постоянство заряда на обкладках конденсатора обусловливает постоянство напряженности электрического поля между обкладками, следовательно, и плотности энергии этого поля.

В связи с тем, что внутри внесенной металлической пластины поле отсутствует, то убыль энергии конденсатора ΔW равна (с обратным знаком) энергии электрического поля в объеме металлической пластинки (если бы оно там было):

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

где E – модуль напряженности поля между обкладками.

Для однородного электрического поля $E = U_0/d_0$, (удобно выразить напряженность через начальные параметры). С учетом этого получим окончательное выражение

$$\Delta W = -\frac{\varepsilon_0 S U_0^2 l}{2 d_0^2},$$

что совпадает с формулой (1).

Проверим единицы в конечных формулах:

$$[\Delta C]=\frac{\Phi}{м}\frac{м^2\cdot м}{м\cdot м}=\Phi;\ [\Delta W]=\frac{\Phi}{м}\frac{м^2\cdot В^2\cdot м}{м^2}=\frac{Кл}{В}В^2=Кл\frac{Дж}{Кл}=Дж.$$

Подставим в них численные значения и получим:

$$W=-\frac{8{,}85\cdot10^{-12}\cdot2\cdot10^{-2}\cdot600^2\cdot2\cdot10^{-3}}{2\cdot\left(5\cdot10^{-3}\right)^2}=-2{,}5\cdot10^{-6}\,Дж.$$

$$\Delta W=-\frac{8{,}85\cdot10^{-12}\cdot2\cdot10^{-2}\cdot600^2\cdot2\cdot10^{-3}}{2\cdot\left(5\cdot10^{-3}\right)^2}=-2{,}5\cdot10^{-6}\,Дж.$$

О т в е т : ΔC = 23,6 пФ; ΔW= –2,5 мкДж.

Пример 16. *Определить плотность электрического тока в медном проводнике (удельное сопротивление ρ = 17 нОм·м), если удельная тепловая мощность тока w = 1,7 Дж/(м^3·с).*

Р е ш е н и е	Д а н о:
Согласно законам Джоуля–Ленца и Ома в дифференциальной форме	p_V = 1,7 Дж/(м^3·с), ρ = 17 нОм·м
	j – ?

$$p_V=\sigma E^2=\frac{E^2}{\rho}, \qquad (1)$$

$$j=\sigma E=\frac{E}{\rho}, \qquad (2)$$

где σ – удельная проводимость материала проводника; E – напряженность электрического поля в металле.

Из (2) получим, что $E = \rho j$. Подставив это выражение в (1), найдем искомую плотность тока:

$$j=\sqrt{\frac{p_V}{\rho}}\ .$$

Проверим единицы в конечной формуле:

$$[j]=\sqrt{\frac{Дж}{м^3\cdot с}\frac{1}{Ом\cdot м}}=\sqrt{\frac{Дж}{м^4\cdot с}\frac{А}{В}}=\frac{1}{м^2}\sqrt{\frac{Дж\cdot А}{с}\frac{Кл}{Дж}}=\frac{1}{м^2}\sqrt{\frac{А\cdot А\cdot с}{с}}=\frac{А}{м^2}.$$

Подставим в нее численные значения и получим:

$$j = \sqrt{\frac{1{,}7}{1{,}7 \cdot 10^{-8}}} = 10^4 \,\frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

О т в е т: $j = 10^4$ А/м^2.

Пример 17. *Сила тока в проводнике равномерно растет от 1 до 3 А за время 6 с. Сопротивление проводника 50 Ом. Определить выделившееся за это время количество теплоты.*

Д а н о:
$I_0 = 1$ А,
$I_{max} = 3$ А,
$\tau = 6$ с,
$R = 50$ Ом
$Q - ?$

Р е ш е н и е

Согласно закону Джоуля–Ленца за бесконечно малый промежуток времени dt выделится теплота

$$dQ = I^2(t)R\,dt\,. \qquad (1)$$

По условию задачи сила тока в проводнике равномерно растет, что можно описать с помощью уравнения

$$I(t) = I_0 + \frac{I_{max} - I_0}{\tau} t. \qquad (2)$$

Проинтегрируем выражение (1):

$$Q = R\int_0^{\tau} I^2(t)\,dt. \qquad (3)$$

Сделаем замену переменных в интеграле $t \to I$. Из (2) следует:

$$dt = \frac{\tau}{I_{max} - I_0} dI;\ 0 \to I_0;\ \tau \to I_{max}\,.$$

В новых переменных соотношение принимает вид

$$Q = \frac{R\tau}{I_{max} - I_0}\int_{I_0}^{I_{max}} I^2 dI = \frac{R\tau}{I_{max} - I_0}\frac{I_{max}^3 - I_0^3}{3} = \frac{R\tau}{3}\left(I_{max}^2 + I_{max}I_0 + I_0^2\right).$$

Конечная формула по структуре совпадает с известным выражением для закона Джоуля − Ленца, поэтому проверка единиц не требуется.

Подставим в нее численные значения и получим:

$$Q = \frac{50 \cdot 6}{3}\left(3^2 + 3 \cdot 1 + 1^2\right) = 1300 \text{ Дж}.$$

О т в е т: Q = 1300 Дж.

Пример 18. *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

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \qquad (1)$$

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

$$R = \frac{4\rho l}{\pi d^2}. \qquad (2)$$

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 19. Б*атарея из двух элементов с ЭДС ε_1 = 8 В и ε_2 = 4 В, внутренние сопротивления которых r_1 = 1 Ом, r_2 = 0,5 Ом, подключена к резистору с сопротивлением R = 50 Ом по схеме, показанной на рисунке 6. Определить силу тока через резистор.*

Д а н о:

ε_1 = 8 В,
ε_2 = 4 В,
r_1 = 1 Ом,
r_2 = 0,5 Ом,
R= 50 Ом

I – ?

Р е ш е н и е

Выберем направление обхода контуров по часовой стрелке и применим правила Кирхгофа для каждого из контуров.

По первому правилу Кирхгофа для узла A:

$$I_2 + I = I_1. \qquad (1)$$

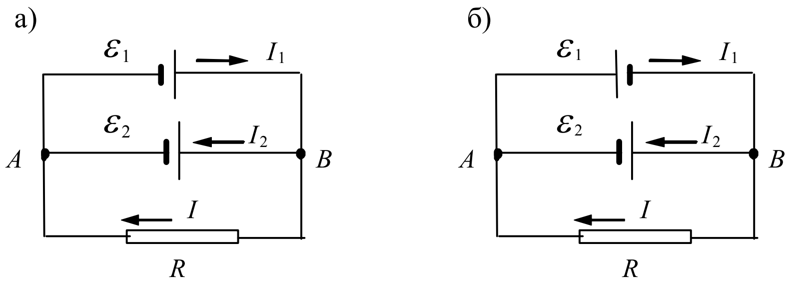

Рисунок 6

Если источники соединены так, как показано на рисунке 6, *а*, то для контуров $\varepsilon_1 BRA\varepsilon_1$ и $\varepsilon_2 BRA\varepsilon_2$ по 2-му правилу Кирхгофа

$$I_1 r_1 + IR = \varepsilon_1 \quad \text{и} \quad -I_2 r_2 + IR = \varepsilon_2. \tag{2}$$

Выразив из (2) значения для I_1 и I_2 и подставив в (1), получим:

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

откуда
$$I = \frac{\varepsilon_2 r_1 + \varepsilon_1 r_2}{Rr_1 + r_1 r_2 + Rr_2}.$$

Подставив в формулы значения величин и произведя вычисления, получим:

$$I = \frac{4 \cdot 1 + 8 \cdot 0{,}5}{50 \cdot 1 + 1 \cdot 0{,}5 + 50 \cdot 0{,}5} \approx 0{,}1\text{А}.$$

Если источники соединены так, как изображено на рисунке 6, *б*, то согласно 2-му правилу Кирхгофа для контуров будем иметь:

а) контура $\varepsilon_1 BRA\varepsilon_1$ $\qquad I_1 r_1 + IR = -\varepsilon_1$,

б) контура $\varepsilon_2 BRA\varepsilon_2$ $\qquad -I_2 r_2 + IR = \varepsilon_2$.

Совместное решение уравнений дает

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

О т в е т: а) $I = 0{,}1$ А; б) $I = 0$.

Пример 20. *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; число электронов, проходящих через поперечное сечение провода за 1 с; среднюю скорость упорядоченного движения электронов, считая число электронов в проводнике равным числу атомов.*

Дано:

U = 50 В,
P = 500 Вт,
τ = 1 мин,
S = 1 мм^2,
η = 0,5

Δt, n, v – ?

Решение

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, пошедшей 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:

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

Число электронов, проходящих через поперечное сечение за 1 с, получим исходя из определения силы тока:

$$n = \frac{I}{e} = \frac{P}{Ue}. \tag{3}$$

Среднюю скорость упорядоченного движения электронов найдем из выражения для плотности тока

$$v = \frac{I}{en_0 S} = \frac{P}{SUen_0}; \quad n_0 = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_А}{V} = \frac{m}{\mu}\frac{N_А}{V} = \frac{N_А \rho}{\mu},$$

где n_0 – число атомов (свободных электронов) в единице объема; N – число атомов в объеме V; ν – количество вещества; $N_А$ – число Авогадро; m и μ – масса и молярная масса вещества.

Следовательно,

$$v = \frac{P\mu}{eN_А \rho SU}. \tag{4}$$

Проверим единицы в соотношениях (2) – (4):

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

$$= \frac{\text{Дж}^2}{\text{с}^2} \frac{\text{В}}{\text{А}} \frac{\text{с} \cdot \text{К}}{\text{Дж} \cdot \text{В}^2} = \frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{с} \cdot \text{А}} \frac{\text{Кл}}{\text{Дж}} = \frac{\text{К} \cdot \text{с} \cdot \text{А}}{\text{с} \cdot \text{А}} = \text{К};$$

$$[n] = \frac{\text{Вт}}{\text{В} \cdot \text{Кл}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \frac{\text{Кл}}{\text{Дж}} \frac{1}{\text{Кл}} = \frac{1}{\text{с}};$$

$$[v] = \text{Вт} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \frac{\text{моль}}{\text{Кл}} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \frac{1}{\text{м}^2 \cdot \text{В}} = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \frac{\text{м}}{\text{Кл}} \frac{\text{Кл}}{\text{Дж}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Подставив в формулы значения величин и произведя вычисления, получим:

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

$$n = \frac{500}{50 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} = 6{,}25 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1};$$

$$v = \frac{500 \cdot 6{,}35 \cdot 10^{-2}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 8{,}93 \cdot 10^{3} \cdot 10^{-6} \cdot 50} = 7{,}4 \cdot 10^{-4}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

О т в е т: $\Delta t = 15$ °C, $n = 6{,}25 \cdot 10^{19}$ с$^{-1}$, $v = 7{,}4 \cdot 10^{-4}$ м/с.

Пример 21 *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 %.*

Д а н о:

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 – ?

Р е ш е н и е

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:

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

Подставим в формулу значения величин

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

О т в е т : l = 2,4 м.

Пример 22. *Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объем V = 375 см^3 и заполнено частично ионизированным газом. Площадь пластины конденсатора S = 250 см^2. При каком напряжении U между пластинами конденсатора сила тока, протекающего через конденсатор, достигнет значения I = 2 мкА, если концентрация пар ионов в газе равна 5,3·10^7 см$^{-3}$? Принять подвижность ионов u_+ = 5,4·10^{-4} м^2/(В·с), u_- = 7,4·10^{-4} м^2/(В·с).*

Д а н о:

V = 375 см^3,
S = 250 см^2,
I = 2 мкА,
n =5,3·10^7 см$^{-3}$,
u_+ = 5,4·10^{-4} м^2/(В·с),
u_- = 7,4·10^{-4} м^2/(В·с)

U – ?

Р е ш е н и е

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

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

Напряженность поля может быть найдена из выражения для плотности тока (закон Ома для газов):

$$j = qn(u_+ + u_-)E ,$$

где $q = e$ – заряд одного иона по модулю. Отсюда

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

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

Подставив выражения E и d в (1), получим

$$U = \frac{IV}{en(u_+ + u_-)S^2} . \tag{2}$$

Проверим единицы в формуле (2)

$$[U] = \frac{\text{А} \cdot \text{м}^3}{\text{Кл}} \text{м}^3 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \frac{1}{\text{м}^4} = \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{с}} \text{В} = \text{В}\,.$$

Подставим в формулу (2) значения величин:

$$U = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 3{,}75 \cdot 10^{-4}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 5{,}3 \cdot 10^{13} \cdot (5{,}4 + 7{,}7) \cdot 10^{-4} \cdot \left(2{,}5 \cdot 10^{-2}\right)^2} \approx 110\,\text{В}\,.$$

О т в е т: U = 110 В.

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 3

3.1 Два малых одинаковых металлических шарика имеют заряды q_1 = 5,6 мкКл и q_2 = –7,2 мкКл. Найти силу их кулоновского взаимодействия после того, как их привели в соприкосновение, а затем удалили друг от друга на расстояние l = 14 см. Диаметры шариков существенно меньше расстояния между ними.

3.2 Два маленьких проводящих шарика подвешены на длинных непроводящих нитях к одной точке. Шарики заряжены одинаковыми зарядами и находятся на расстоянии 5 см друг от друга. Как изменится расстояние между шариками после того, как один из шариков разрядили?

3.3 Два одинаковых металлических шарика имеют заряды q_1= 3,6 нКл и q_2= 8 нКл. Найти силу их взаимодействия после соприкосновения и удаления друг от друга на расстояние l= 12 см.

3.4 В вершинах равностороннего треугольника со стороной 2 см находятся одинаковые положительные заряды по 0,46 мкКл каждый. Найти силу, действующую на каждый из этих зарядов.

3.5 Тонкий стержень длиной 15 см равномерно заряжен. Линейная плотность заряда 6 мкКл/м. Заряд 12 нКл равноудален от концов стержня на расстояние 10 см. Найти силу взаимодействия стержня и точечного заряда.

3.6 Расстояние между двумя точечными зарядами q_1= 1 мкКл и q_2= – 1 мкКл равно 10 см. Найти силу, действующую на точечный заряд q_0= 0,1 мкКл, удаленный на 6 см от первого и на 8 см от второго зарядов.

3.7 Тонкий стержень длиной 10 см несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью τ = 1 мкКл/м. На продолжении оси стержня на расстоянии 20 см от ближайшего конца находится точечный заряд 100 нКл. Найти силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.

3.8 Тонкая нить длиной l = 20 см заряжена с линейной плотностью τ = 10 нКл/м. На расстоянии l_1 = 10 см от нити, против ее середины, находится точечный заряд q_0= 1 нКл. Вычислить силу, действующую на этот заряд со стороны заряженной нити.

3.9 На двух одинаковых маленьких капельках воды находится по одному лишнему электрону. Определить радиус капелек, если сила электростатического отталкивания уравновешивает силу их гравитационного притяжения.

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

3.11 Два заряженных шарика массой по 10 г подвешены на нитях длиной 1 м каждая к одной точке, в которой находится третий шарик с таким же зарядом. Определить заряды шариков и силу натяжения нитей, если угол расхождения их в положении равновесия равен 60º.

3.12 Шарик массой 10 г и зарядом 2 мкКл, подвешенный на нити длиной 1 м, вращается в горизонтальной плоскости вокруг такого же неподвижного шарика. Определить угловую скорость равномерного вращения и силу натяжения нити, если нить образует с вертикалью угол 60º.

3.13 Сила электростатического отталкивания уравновешивает силу гравитационного притяжения двух одинаковых капелек воды радиусом 0,1 мм. Определить заряд капель.

3.14 Два заряженных шарика, подвешенных на нитях одинаковой длины, опускаются в керосин. Какой должна быть плотность материала шариков, чтобы угол расхождения нитей в воздухе и в керосине не изменился?

3.15 Два шарика массой 5 г каждый подвешены на нитях длиной 5 м так, что они соприкасаются друг с другом. Шарикам сообщают одноименные заряды 80 нКл. На какое расстояние они разойдутся после зарядки?

3.16 На тонкой прямой металлической проволоке длиной 8 см равномерно распределен заряд q_0= 350 мкКл, действующий с силой 120 мкН на точечный заряд q, который находится на продолжении той же проволоки на расстоянии 6 см от ее середины. Определить величину точечного заряда q.

3.17 Два одинаковых шарика массой 20 мг каждый подвешены на нитях длиной 0,2 м, закрепленных в одной точке подвеса. Один из шариков отвели в сторону и зарядили. После соприкосновения с другим шариком они разошлись так, что нити образовали угол 60º.Определить величину заряда, сообщенного первому шарику.

3.18 Два одинаковых шарика подвешены на нитях одинаковой длины. При сообщении им заряда они разошлись на угол 80º.Через некоторое время шарики сблизились до угла 60º. Какая доля первоначального заряда осталась на каждом из шариков?

3.19 Два одноименных заряда 0,7 и 1,3 нКл находятся на расстоянии 6 см друг от друга. На каком расстоянии между ними нужно поместить третий заряд, чтобы результирующая сила, действующая на каждый заряд, была равна нулю?

3.20 Два точечных заряда величиной 1,1 нКл каждый находятся на расстоянии 17 см. С какой силой они действуют на такой же заряд, находящийся на расстоянии 17 см от каждого из них?

3.21 В сосуд с маслом погружен эбонитовый шарик радиусом 0,01 м и зарядом 20 мКл. Определить, при какой напряженности вертикального электростатического поля шарик будет находиться во взвешенном состоянии.

3.22 Расстояние между зарядами $q_1 = -1$ нКл и $q_2 = 10$ нКл равно $l = 0{,}55$ м. Определить напряженность поля E в точке на прямой, проходящей через заряды, в которой потенциал φ равен нулю.

3.23 В двух противоположных вершинах квадрата со стороной 0,1 м находятся заряды величиной 0,2 мкКл каждый. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в двух других вершинах квадрата.

3.24 Сплошная металлическая сфера радиусом 20 см равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда, равной 1 нКл/м^2. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в точках: а) на расстоянии 16 см от центра сферы; б) на внешней поверхности сферы; с) на расстоянии 36 см от центра сферы. Построить графики $E = E(r)$ и $\varphi = \varphi(r)$.

3.25 Точечные заряды $q_1 = 20$ нКл и $q_2 = -10$ нКл находятся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, удаленной на расстояние $r_1 = 8$ см от первого и $r_2 = 7$ см от второго зарядов.

3.26 В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые заряды 2 нКл. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в центре квадрата.

3.27 Точечные заряды $q_1 = -2$ нКл и $q_2 = 4$ нКл находятся на расстоянии $d_1 = 60$ см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, лежащей посередине между зарядами. Чему будет равна напряженность, если первый заряд положительный?

3.28 В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые заряды 2 нКл. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в середине одной из сторон квадрата.

3.29 Поле создано двумя равномерно заряженными концентрическими сферами радиусами $R_1 = 5$ см и $R_2 = 8$ см. Заряды сфер равны $q_1 = 2$ нКл и $q_2 = -1$ нКл соответственно. Определить напряженность электростатического поля в точках, лежащих от центра сфер на расстояниях: 1) $r_1 = 3$ см; 2) $r_2 = 6$ см; 3) $r_3 = 10$ см. Построить график зависимости $E(r)$.

3.30 Шар радиусом 10 см равномерно заряжен с объемной плотностью 10 нКл/м^3. Определить напряженность электростатического поля на расстояниях $r_1 = 5$ см и $r_2 = 15$ см от центра шара. Построить график зависимости $E(r)$.

3.31 Капля массой $m = 5{,}6 \cdot 10^{-9}$ г поднимается вертикально вверх между пластинами горизонтально расположенного конденсатора с ускорением $a = 1{,}2$ м/с^2. Найти поверхностную плотность заряда σ на пластинах конденсатора, если заряд капли равен 10 зарядам электрона.

3.32 Найти силу F, действующую на заряд $q = 8{,}3$ нКл, находящийся на расстоянии $r = 5{,}2$ см от бесконечно длинной нити, заряженной равномерно с линейной плотностью заряда $\tau = 30$ мкКл/м.

3.33 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 вектора напряженности Φ_E через этот круг.

3.34 Плоская квадратная рамка со стороной длиной $a = 10$ см находится на некотором расстоянии от бесконечной равномерно заряженной плоскости. Плоскость пластины с линиями поля составляет угол $\varphi = 30°$. Поверхностная плотность заряда $\sigma = 1$ мкКл/м^2. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через эту пластину.

3.35 Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью $\sigma = 20$ нКл/м^2. Параллельно ей расположена прямая тонкая нить, заряженная равномерно с линейной плотностью заряда $\tau = 0{,}4$ нКл/м. Определить силу, действующую на отрезок нити длиной 1 м.

3.36 Протон, летящий по направлению к неподвижному ядру гелия, в некоторой точке напряженностью 10^4 В/м имеет скорость 1 Мм/с. На какое расстояние протон сможет приблизиться к ядру?

3.37 Кольцо радиусом 5 см из тонкой проволоки равномерно заряжено с линейной плотностью 14 нКл/м. Определить напряженность электростатического поля на оси, проходящей через центр кольца, в точке, удаленной на расстояние 10 см от центра кольца.

3.38 Заряд 20 нКл равномерно распределен на металлической прямой нити длиной 1 м. Определить напряженность поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от нити и равноудаленной от ее концов.

3.39 Два неподвижных одноименных заряда $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл каждый находятся на расстоянии $r = 3{,}9 \cdot 10^{-11}$ м. Вдоль перпендикуляра, проходящего через середину отрезка, соединяющего эти заряды, движется электрон. Найти максимальную силу взаимодействия F_{max} электрона и этих зарядов.

3.40 В однородном электростатическом поле равномерно вращается шарик массой 0,5 г с положительным зарядом 10 нКл, подвешенный на нити длиной 0,5 м. Определить силу натяжения нити и кинетическую энергию шарика, если напряженность поля направлена вертикально вниз и равна 100 кВ/м. Нить образует с вертикалью угол 60°.

3.41 Вблизи бесконечной заряженной плоскости находится точечный заряд 10^{-8} Кл. Под действием поля заряд перемещается вдоль силовой линии на расстояние 17,7 см. При этом совершается работа 1 мДж. Определить поверхностную плотность заряда.

3.42 Кольцо радиусом 5 см из тонкой проволоки несет равномерно распределенный заряд 10 нКл. Определить потенциал электростатического поля на оси, проходящей через центр кольца, в точке, удаленной на расстояние 10 см от центра кольца.

3.43 Сфера радиусом 5 см равномерно заряжена с поверхностной плотностью 1 нКл/м^2. Определить разность потенциалов электростатического поля между точками этого поля, лежащими на расстояниях 10 см и 15 см от центра сферы.

3.44 Найти силу отталкивания (на единицу длины) двух одноименно заряженных бесконечно длинных параллельных нитей с одинаковой линейной плотностью заряда 3 мкКл/м, находящихся в вакууме на расстоянии 2 см друг от друга. Найти также работу (на единицу длины), которую нужно совершить, чтобы сблизить эти нити до расстояния 1 см.

3.45 Положительные заряды $q_1 = 3{,}7 \cdot 10^{-5}$ Кл и $q_2 = 6{,}2 \cdot 10^{-5}$ Кл находятся в вакууме на расстоянии r_1 = 2,7 м друг от друга. Найти работу, которую нужно совершить, чтобы сблизить заряды до расстояния r_2 = 45 см.

3.46 Найти работу, которую нужно совершить, чтобы перенести точечный заряд q = 42 нКл из точки, отстоящей на расстоянии 1 м, в точку, находящуюся на расстоянии 1,5 см от поверхности шара радиусом R = 2,3 см, заряженного с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 4{,}3 \cdot 10^{-11}$ Кл/м^2.

3.47 Бесконечно длинная нить заряжена равномерно с линейной плотностью заряда τ = 63 мкКл/м. Найти работу сил поля по перемещению точечного q = 2,1 нКл с расстояния a = 2,4 см до расстояния b = 4,8 см от нити.

3.48 Две удаленные от остальных тел одинаковые металлические пластины площадью S = 50 см^2 каждая находятся на расстоянии d = 1 мм друг от друга и заряжены: одна зарядом q_1 = 20 мкКл, вторая q_2 = – 40 мкКл. Найти разность потенциалов $\Delta\varphi$ между ними.

3.49 Две концентрические проводящие сферы заряжены одноименно. Их радиусы равны 12 и 18 см. Заряд внутренней сферы равен 1 мкКл, а внешней – 2 мкКл. Найти разность потенциалов $\Delta\varphi$ между сферами.

3.50 Две бесконечные параллельные плоскости отстоят на расстоянии d = 1 см друг от друга. Плоскости равномерно заряжены, поверхностные плотности заряда соответственно σ_1 = 0,2 мкКл/м^2 и σ_2 = 0,5 мкКл/м^2. Найти разность потенциалов между пластинами.

3.51 Электрическое поле создано положительным точечным зарядом. Потенциал поля в точке, удаленной от заряда на r = 12 см, равен 24 В. Определить значение и направление градиента потенциала поля в этой точке.

3.52 Электростатическое поле создается положительно заряженной бесконечной нитью ,заряженной равномерно с линейной плотностью τ = 100 пКл/см. Определить значение и направление градиента потенциала поля в точке, удаленной от нити на r = 12 см.

3.53 Электростатическое поле создается бесконечной плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью σ = 5 нКл/м^2. Определить разность потенциалов между двумя точками, лежащими на расстояниях $r_1 = 20$ см и $r_2 = 40$ см от плоскости.

3.54 Электростатическое поле создается равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом $R = 15$ см с общим зарядом $Q = 30$ нКл. Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $r_1 = 10$ см и $r_2 = 20$ см от поверхности сферы.

3.55 Электростатическое поле создается шаром радиусом $R = 10$ см, равномерно заряженным с обьемной плотностью $\rho = 10$ нКл/м^3. Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях $r_1 = 15$ см и $r_2 = 25$ см от центра шара.

3.56 Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью $\sigma = 4$ нКл/м^2. Определить значение и направление градиента потенциала поля, созданного этой плоскостью.

3.57 Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора параллельно пластинам с начальной скоростью $v_0 = 10$ Мм/с. Насколько приблизится электрон к положительной пластине за время движения внутри конденсатора, если разность потенциалов $U = 30$ В, расстояние d между пластинами равно 16 мм и длина пластин $l = 6$ см?

3.58 Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора параллельно пластинам с начальной скоростью $v_0 = 10$ Мм/с. При вылете из конденсатора направление скорости электрона составляло угол $\alpha = 35^\circ$ с первоначальным направлением скорости. Определить разность потенциалов между пластинами, если длина пластин равна 10 см, а расстояние между ними 2 см.

3.59 В вершинах треугольника со сторонами АВ = 0,3 м, ВС = 0,5 м и АС = 0,6 м находятся три точечных заряда $q_A = 3$ мкКл, $q_B = 5$ мкКл, $q_C = -6$ мкКл. Какую работу нужно совершить, чтобы развести эти заряды на расстояние, чтобы силы их взаимодействия можно было считать равными нулю?

3.60 Определить потенциал φ, до которого можно зарядить уединенный металлический шар радиусом $R = 10$ см, если напряженность поля, при которой происходит пробой воздуха, $E = 3$ МВ/м. Найти также максимальную поверхностную плотность σ электрических зарядов перед пробоем.

3.61 Металлический шарик диаметром $d = 2$ см заряжен отрицательно до потенциала $\varphi = -150$ В. Сколько избыточных электронов N находится на поверхности шарика?

3.62 В вершинах квадрата со стороной 10 см находятся одинаковые заряды 100 нКл. Определить потенциальную энергию этой системы.

3.63 Кольцо радиусом 5 см из тонкой проволоки несет равномерно распределенный заряд 10 нКл. Определить потенциал электростатического поля в центре кольца.

3.64 Два шара диаметром $d_1 = 1$ см и $d_2 = 3$ см и зарядами $q_1 = 5$ нКл и $q_2 = 15$ нКл соединяют проводником. Определить величину переместившегося заряда.

3.65 В вершинах равностороннего треугольника со стороной 10 см находятся одинаковые заряды 100 нКл. Определить потенциальную энергию этой системы.

3.66 Шар диаметром d_1=1 см, заряженный до потенциала 500 В, соединяется проводником с незаряженным шаром. После соединения потенциал шаров стал равным 200 В. Найти диаметр второго шара.

3.67 Электростатическое поле создается в вакууме бесконечным цилиндром радиусом 10 см, равномерно заряженным с линейной плотностью τ = 10 нКл/м. Определить разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях r_1 = 2 мм и r_2 = 7 мм от поверхности этого цилиндра.

3.68 По тонкому кольцу радиуса R = 5 см равномерно распределен заряд с линейной плотностью τ = 20 нКл/м. Определить потенциал в точке, лежащей на оси кольца на расстоянии r = 5 см от плоскости кольца.

3.69 Определить потенциал в центре тонкого кольца радиуса R = 15 см, по которому равномерно распределен заряд с линейной плотностью τ = 10 нКл/м.

3.70 Шар диаметром d =10 см заряжается отрицательно до потенциала φ = 1 кВ. Найти общую массу избыточных электронов.

3.71 Десять заряженных водяных капель радиусом 1 мм и зарядом 0,3 нКл каждая сливаются в одну большую каплю. Определить потенциал большой капли.

3.72 Найти соотношение между радиусом шара R и максимальным потенциалом φ, до которого он может быть заряжен в воздухе, если считать, что разряд в воздухе происходит при напряженности поля E = 3 МВ/м.

3.73 Точечные заряды q_1 = 2 нКл и q_2 =10 нКл находятся на расстоянии r_1 = 5 см друг от друга. Найти работу сил поля , если второй заряд удалится на расстояние : 1) r_2 = 10 см , 2) $r_3 = \infty$.

3.74 Электростатическое поле создается бесконечной плоскостью, равномерно заряженной с поверхностной плотностью σ = 50 нКл/м^2. Определить разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях r_1 = 10 см и r_2 = 200 см от плоскости.

3.75 Электростатическое поле создается равномерно заряженной сферической поверхностью радиусом R = 10 см с общим зарядом Q = 10 нКл. Определите разность потенциалов между двумя точками этого поля, лежащими на расстояниях r_1 = 10 см и r_2= 20 см от поверхности сферы.

3.76 Эбонитовый толстостенный полый шар несет равномерно распределенный по обьему заряд q =20 мкКл/м^3. Внутренний радиус шара R_1 = 2 см, наружный R_2 = 4 см. Определить потенциал шара в следующих точках: 1) на наружной поверхности шара; 2) на внутренней поверхности шара; 3) в центре шара.

3.77 Две бесконечные плоскости, равномерно заряженные с поверхностной плотностью $\sigma = 0{,}5$ мкКл/м^2, пересекаются под углом $\alpha = 60°$. Начертить картину эквипотенциальных поверхностей и вычислить работу сил поля по перемещению заряда $q = 1$ нКл из точки A, лежащей в одной из плоскостей на расстоянии l_1 от линии пересечения плоскостей, в точку B, лежащую в другой плоскости на расстоянии l_2 от той же линии.

3.78 На отрезке прямого провода равномерно распределен заряд с линейной плотностью $\tau = 1$ мкКл/м. Определить работу A сил поля по перемещению заряда $q = 1$ нКл из точки B, лежащей на продолжении оси провода на расстоянии l_1 от конца провода, в точку C, лежащую на продолжении той же оси на расстоянии $2l_1$ от конца провода.

3.79 Тонкий стержень согнут в полукольцо. Стержень заряжен с линейной плотностью заряда $\tau = 100$ нКл/м. Какую работу надо совершить, чтобы перенести заряд $q = 5$ нКл из центра полукольца в бесконечность?

3.80 Тонкий стержень согнут в кольцо радиуса $R = 15$ см. Он заряжен с линейной плотностью заряда $\tau = 500$ нКл/м. Какую работу надо совершить, чтобы перенести заряд $q = 10$ нКл из центра кольца в точку A, расположенную на оси кольца на расстоянии $l = 20$ см от его центра?

3.81 В однородное электростатическое поле напряженностью $E_0 = 700$ В/м перпендикулярно полю помещается бесконечная плоскопараллельная стеклянная пластинка. Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стекле.

3.82 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено парафином. Расстояние между пластинами равно 8,85 мм. Какую разность потенциалов нужно подать на пластины, чтобы поверхностная плотность связанных зарядов на парафине составляла
$\sigma' = 0{,}1$ нКл/см^2?

3.83 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 5$ мм. После зарядки конденсатора до разности потенциалов $\Delta\varphi = 500$ В между пластинами конденсатора вдвинули стеклянную пластинку. Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стеклянной пластинке.

3.84 Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на слюдяной пластинке толщиной $d = 1$ мм, служащей изолятором плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами конденсатора $\Delta\varphi = 300$ В.

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

3.86 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 1$ см, разность потенциалов $\Delta\varphi = 200$ В. Определить поверхностную плотность σ' связанных зарядов эбонитовой пластинки толщиной $d_1 = 8$ мм, помещенной на нижнюю пластину конденсатора.

3.87 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено стеклом. Расстояние между пластинами 5 мм. Разность потенциалов равна 1 кВ. Определить: 1) поверхностную плотность зарядов σ на пластинах конденсатора; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стекле.

3.88 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d = 5$ мм, а разность потенциалов $U = 150$ В. К одной из пластин прилегает плоскопараллельная фарфоровая пластинка толщиной $d_1 = 3$ мм. Определить: 1) напряженность электростатического поля в фарфоре и воздухе; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на пластинке фарфора.

3.89 Найти силу взаимодействия двух молекул воды, электрические моменты которых расположены вдоль одной прямой. Молекулы находятся друг от друга на расстоянии $2{,}5 \cdot 10^{-7}$ см. Электрический момент молекулы воды $p = 6{,}2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м.

3.90 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено парафином. Расстояние между пластинами $d = 5$ мм. Разность потенциалов $U = 4$ кВ. Определить: 1) поверхностную плотность зарядов σ на пластинах конденсатора; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на диэлектрике.

3.91 Поверхностная плотность связанных зарядов на поверхности слюдяной пластинки толщиной $d = 0{,}2$ мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, $\sigma' = 2{,}88 \cdot 10^{-5}$ Кл/м^2. Найти разность потенциалов между обкладками конденсатора.

3.92 Между пластинами плоского конденсатора находится диэлектрик. На пластины подана разность потенциалов $U_1 = 200$ В, расстояние между пластинами $d = 1$ мм. Если, отключив источник напряжения, вынуть диэлектрик из конденсатора, то разность потенциалов между пластинами возрастет до $U_2 = 800$ В. Найти: а) диэлектрическую проницаемость диэлектрика; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ'.

3.93 Металлический шар радиусом $R_1 = 2$ см с зарядом $q = 8{,}1 \cdot 10^{-9}$ Кл окружен вплотную прилегающим слоем диэлектрика ($\varepsilon = 3$) с внешним радиусом $R_2 = 5$ см. Найти поверхностную плотность связанных зарядов σ'_1 и σ'_2 на обеих сторонах диэлектрика.

3.94 Диполь, электрический момент которого $p = 3 \cdot 10^{-10}$ Кл·м, свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью $E = 1500$ В/см. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть диполь на угол $\alpha = 180^\circ$?

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

3.96 Определить поляризованность P стекла, помещенного во внешнее электрическое поле напряженностью $E_0 = 5$ МВ/м. Границы пластины перпендикулярны силовым линиям поля.

3.97 При какой поляризованности P диэлектрика ($\varepsilon = 5$) напряженность среднего макроскопического поля в диэлектрике равна 10 МВ/м?

3.98 При какой напряженности среднего макроскопического поля в диэлектрике ($\varepsilon = 3$) поляризованность P диэлектрика достигнет значения, равного 200 мкКл/м^2?

3.99 Диэлектрик поместили в электрическое поле напряженностью $E_0 = 10$ МВ/м. Найти поляризованность диэлектрика, если напряженность среднего макроскопического поля в диэлектрике равна 10 кВ/м?

3.100 Эбонитовая плоскопараллельная пластина помещена в однородное электрическое поле напряженностью $E_0 = 2$ МВ/м. Границы пластины перпендикулярны силовым линиям. Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на гранях пластины.

3.101 Молекула HF обладает дипольным электрическим моментом $p = 6{,}4 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Межъядерное расстояние $d = 92$ пм. Найти заряд q такого диполя и объяснить, почему найденное значение заряда отличается от значения элементарного заряда e.

3.102 Расстояние d между пластинами плоского конденсатора равно 2 мм, разность потенциалов $U = 1{,}8$ кВ. Диэлектрик — стекло. Определить поверхностную плотность поляризационных (связанных) зарядов σ' на поверхности стекла.

3.103 Электрическое смещение в конденсаторе $D = 10^{-10}$ Кл/м^2. Определить поверхностную плотность зарядов σ на пластинах этого конденсатора и напряженность электрического поля.

3.104 Поверхностная плотность связанных зарядов на поверхности слюдяной пластинки толщиной 0,1 мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, $\sigma' = 5 \cdot 10^{-7}$ Кл/м^2. Найти напряжение на обкладках конденсатора.

3.105 В однородное электростатическое поле напряженностью $E_0 = 1000$ В/м перпендикулярно полю помещается бесконечная плоскопараллельная фарфоровая пластинка. Определить: 1) напряженность поля внутри пластины; 2) электрическое смещение внутри пластины; 3) поляризованность фарфора.

3.106 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено слюдой. Расстояние между пластинами 3 мм. Какую разность потенциалов нужно подать на пластины, чтобы поверхностная плотность связанных зарядов σ' на слюде составляла 0,1 нКл/см^2?

3.107 Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет 3 мм. После зарядки конденсатора до разности потенциалов 220 В между пластинами конденсатора вдвинули стеклянную пластинку. Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стеклянной пластинке.

3.108 Определить поверхностную плотность связанных зарядов σ' на слюдяной пластинке толщиной d = 0,5 мм, служащей изолятором плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами конденсатора $\Delta\varphi$ = 500 В.

3.109 Между пластинами плоского конденсатора помещено два слоя диэлектрика: фарфоровая пластинка толщиной d_1 = 1 мм и слюдяная толщиной d_2 = 0,5 мм. Разность потенциалов между пластинами конденсатора U = 300 В. Определить: 1) напряженности электростатических полей в слоях диэлектрика; 2) электрическое смещение.

3.110 Диэлектрик поместили в электрическое поле напряженностью E_0 = 50 кВ/м. Чему равна поляризованность P диэлектрика, если напряженность E среднего макроскопического поля в диэлектрике стала равной 10 кВ/м?

3.111 Определить поляризованность P фарфора, помещенного во внешнее электрическое поле перпендикулярно силовым линиям, напряженность поля E_0 = 1 МВ/м.

3.112 При какой поляризованности Р диэлектрика (ε = 2,7) напряженность среднего макроскопического поля в диэлектрике равна 1 МВ/м?

3.113 При какой напряженности среднего макроскопического поля в диэлектрике (ε = 6) поляризованность P диэлектрика достигнет значения, равного 100 мкКл/м^2?

3.114 Поверхностная плотность связанных зарядов на поверхности слюдяной пластинки толщиной 0,2 мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, σ' = 5 нКл/м^2. Найти напряжение на обкладках конденсатора.

3.115 Определить поверхностную плотность поляризационных (связанных) зарядов на поверхности фарфора, если расстояние d между пластинами плоского конденсатора равно 1 мм, разность потенциалов на обкладках U = 500 В.

3.116 Определить напряженность E электростатического поля, созданного диполем, электрический момент которого $p = 5\cdot10^{-10}$ Кл·м, на расстоянии r = 1 см от центра диполя в направлении, составляющим угол $\alpha = 30^\circ$ с плечом диполя.

3.117 Между пластинами плоского конденсатора находится диэлектрик (ε = 6). Площадь пластин S = 200 см^2. Пластины притягиваются друг к другу с силой F = 2,5 мН. Найти поверхностную плотность связанных зарядов на поверхности диэлектрика σ'.

3.118 Медный шар радиусом R_1 = 2 см с зарядом $q = 8{,}1\cdot10^{-9}$ Кл окружен концентрической заземленной сферой радиусом R_3 = 6 см. Между шаром и сферой расположен слой фарфора сферической формы, примыкающий вплотную к внутреннему шару и имеющий наружный радиус R_2 = 4 см. Найти потенциал внутреннего шара φ и поверхностную плотность связанных зарядов σ'_1 и σ'_2 на обеих сторонах фарфорового слоя.

3.119 Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено диэлектриком, молекулы которого можно рассматривать как жесткие диполи с электрическим моментом $2\cdot10^{-30}$ Кл·м. Концентрация диполей равна 10^{26} м$^{-3}$. Определить напряженность среднего макроскопического поля в таком диэлектрике, если при отсутствии диэлектрика напряженность E_0 поля между пластинами равна 100 МВ/м. Разориентирующим действием теплового движения молекул пренебречь.

3.120 Найти напряженность поля, созданного диполем, электрический момент которого $p = 6{,}2\cdot10^{-30}$ Кл·м, на расстоянии $r = 3$ нм от середины диполя в точке, лежащей: 1) на продолжении диполя; 2) на перпендикуляре к диполю.

3.121 Определить емкость плоского конденсатора, если расстояние между пластинами $d = 0{,}5$ мм, площадь пластин $S = 10$ см^2, а изоляционным материалом служит фарфор.

3.122 Определить емкость сферического конденсатора, если радиусы сфер 1,2 мм и 1,5 мм, а изоляционным материалом служит фарфор.

3.123 Определить емкость коаксиального кабеля длиной 1 м, если радиус его центральной жилы $r_1 = 0{,}4$ мм, радиус металлической оболочки $r_2 = 1{,}0$ мм, а изоляционным материалом служит каучук.

3.124 Определить емкость уединенной проводящей сферы радиуса $R = 1$ мм^2, находящейся в воздушной среде.

3.125 Определить емкость шара радиуса $R = 1$ мм^2, погружённого в трансформаторное масло.

3.126 Определить расстояние между пластинами плоского конденсатора, если напряжение между ними $U = 150$ В. Площадь каждой пластины $S = 100$ см^2, ее заряд $q = 10$ нКл. Диэлектриком служит слюда.

3.127 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь каждой пластины $S = 200$ см^2, расстояние между ними $d =$ 1,5 мм. После отключения конденсатора от источника питания в пространство между пластинами внесли парафин. Определить разность потенциалов U_2 между пластинами после внесения диэлектрика. Определить также емкости конденсатора C_1 и C_2до и после внесения диэлектрика.

3.128 Определить емкость коаксиального кабеля длиной 10 м, если радиус его центральной жилы $r_1 = 1$ см, радиус металлической оболочки $r_2 = 1{,}5$ см, а изоляционным материалом служит резина.

3.129 Сферический конденсатор состоит из двух концентрических сфер радиусами $r_1 = 5$ см и $r_2 = 5{,}5$ см. Пространство между обкладками заполнено маслом. Определить шар какого радиуса, помещенный в масло, обладает такой емкостью.

3.130 Шар, погружённый в трансформаторное масло, имеет поверхностную плотность заряда $\sigma = 1$ мкКл/м^2 и потенциал $\varphi = 500$ В. Определить энергию шара.

3.131 К пластинам плоского воздушного конденсатора емкостью $C = 10$ пФ приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. После отключения конденсатора от источника питания расстояние между пластинами было увеличено в 3 раза. Определить: 1) разность потенциалов U_2 между пластинами после их раздвижения; 2) работу внешних сил по раздвижению пластин.

3.132 Тысяча водяных капель одинакового радиуса и одинаково заряженных сливаются в одну большую каплю. Во сколько раз энергия большой капли превышает соответствующую величину одной малой капли? Поверхностное натяжение не учитывать.

3.133 Определить емкость коаксиального кабеля длиной 1 м, если радиус его центральной жилы $r_1 = 1$ мм, радиус оболочки $r_2 = 1{,}5$ мм, а изоляционным материалом служит полиэтилен.

3.134 Сферический конденсатор состоит из двух концентрических сфер радиусами $r_1 = 5$ мм и $r_2 = 6$ мм. Пространство между обкладками заполнено полиэтиленом. Определить емкость этого конденсатора.

3.135 Шар, погружённый в касторовое масло, имеет поверхностную плотность заряда $\sigma = 15$ мкКл/м^2 и потенциал $\varphi = 1000$ В. Определить энергию шара.

3.136. К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 100$ В. Площадь каждой пластины $S = 100$ см^2, расстояние между ними $d = 1$ мм. После отключения конденсатора от источника питания в пространство между пластинами внесли эбонит. Определить разность потенциалов U_2 между пластинами после внесения диэлектрика. Определить также емкости конденсатора C_1 и C_2 до и после внесения диэлектрика.

3.137 К пластинам плоского воздушного конденсатора емкостью $C = 100$ пФ приложена разность потенциалов $U_1 = 100$ В. После отключения конденсатора от источника питания расстояние между пластинами было увеличено в 3 раза. Определить разность потенциалов U_2 между пластинами после их раздвижения.

3.138 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь каждой пластины $S = 200$ см^2, расстояние между ними $d = 1{,}5$ мм. При подключенном конденсаторе к источнику питания в пространство между пластинами внесли парафин. Определить заряды на пластинах q_1 и q_2, а так-же емкости конденсатора C_1 и C_2 до и после внесения диэлектрика.

3.139 В плоский конденсатор вдвинули пластину из эбонита толщиной $d = 0{,}5$ мм, которая плотно прилегает к обеим пластинам. Как изменится электрическая емкость конденсатора до и после внесения диэлектрика?

3.140 Емкость плоского конденсатора $C = 4$ мкф, расстояние между пластинами 2 мм. Какова будет емкость конденсатора, если на нижнюю пластину положить лист эбонита толщиной 1 мм?

3.141 Одному шару сообщили заряд +13 нКл, второму – +18 нКл. Затем шары соединили проволокой. Найти окончательное распределение зарядов на шарах. Радиус первого шара равен 8 см, второго – 18 см.

3.142 Два металлических шара находятся в воздухе и имеют одинаковые заряды q = 1 нКл. После соединения шаров тонким проводником потенциал их стал φ = 120 В. Определить радиус первого шара, если емкость второго C_2 = 10 пФ.

3.143 Конденсатор емкостью C_1 = 20 мкФ заряжен до напряжения U_1 = 200 В. К нему параллельно присоединяют незаряженный конденсатор емкостью C_2 = 300 мкФ. Какое напряжение установится после их соединения?

3.144 Конденсаторы емкостями C_1 = 1 мкФ и C_2 = 2 мкФ заряжены до разности потенциалов $\Delta\varphi_1$ = 10 В и $\Delta\varphi_2$ = 50 В соответственно. После зарядки конденсаторы соединили одноименными полюсами. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ между обкладками конденсаторов после их соединения.

3.145 Конденсатор емкостью C_1 = 1 мкФ выдерживает напряжение не более U_1 = 6 кВ, конденсатор емкостью C_2 = 2 мкФ — не более U_2 = 4 кВ. Какое напряжение U может выдержать система из этих двух конденсаторов при их последовательном соединении?

3.146 Два конденсатора емкостями 9 и 18 нФ соединили последовательно и подключили к источнику тока напряжением 600 В, затем отсоединили от источника и, не разряжая, соединили параллельно одноименно заряженными пластинами. Определить изменение заряда на каждом конденсаторе и напряжение на батарее.

3.147 Конденсатор емкостью C_1= 1 мкФ заряжен до напряжения 220 В и соединен параллельно одноименно заряженными пластинами с другим конденсатором емкостью C_2= 0,5 мкФ, заряженным до напряжения 50 В. Определить величину перетекшего заряда.

3.148 Два конденсатора емкостью C_1= 1 мкФ и C_2= 0,5 мкФ соединены между собой и присоединены к батарее с ЭДС $\mathcal{E}$ = 100 В. Определить заряд каждого конденсатора и разность потенциалов между его обкладками, если конденсаторы соединены последовательно.

3.149 Определить емкость C батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 7. Емкость каждого конденсатора C_i= 1 мкФ.

3.150 В схеме, приведенной на рисунке 8, известно, что емкости конденсаторов C_1= C_5 = 6 мкФ, C_2 = 1,5 мкФ, C_3 = C_4 =3 мкФ и напряжение на клеммах U= 100 В. Определить емкость батареи, заряд и напряжение на каждом конденсаторе.

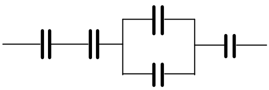

Рисунок 7

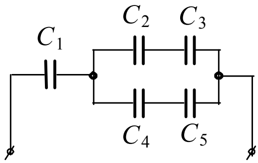

Рисунок 8

3.151 Определить емкость C батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 9. Емкость каждого конденсатора C_i = 1 мкФ.

3.152 Определить емкость C батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 10. Емкость каждого конденсатора C_i = 1 мкФ.

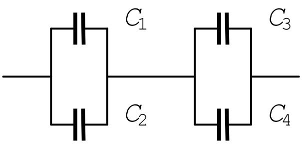

Рисунок 9

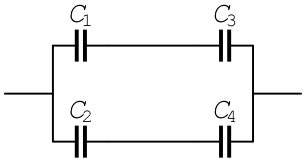

Рисунок 10

3.153 Определить емкость C батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 11. Емкость каждого конденсатора C_i = 1 мкФ.

3.154 Определить емкость C батареи конденсаторов, изображенной на рисунке 12. Емкость каждого конденсатора C_i = 1 мкФ.

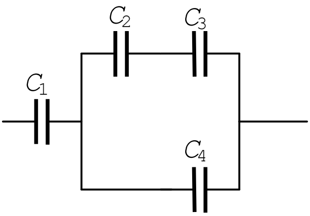

Рисунок 11

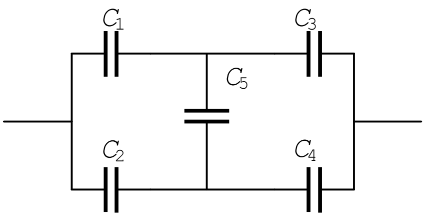

Рисунок 12

3.155 Два конденсатора емкостями C_1 = 1 мкФ и C_2 = 0,5 мкФ соединены между собой и присоединены к батарее с ЭДС $\mathcal{E}$ = 100 В. Определить заряд каждого конденсатора и разность потенциалов между его обкладками, если конденсаторы соединены параллельно.

3.156 В плоский конденсатор, расстояние между обкладками которого 5 мм и напряжение между ними 300 В, ввели параллельно обкладкам металлическую пластинку толщиной 0,2 см. Определить напряжение на обкладках после введения пластинки.

3.157 Две заряженные концентрические сферы находятся в воздухе. Потенциалы электрического поля на расстояниях 5, 40 и 60 см от центра сфер равны 2100, – 150 и – 250 В. Найти заряды обеих сфер и радиус большей сферы, если радиус меньшей сферы равен 10 см, а радиус большей сферы больше 40 см и меньше 60 см.

3.158 Две заряженные концентрические сферы, расположенные в воздухе, имеют радиусы 20 и 60 см. Напряжённость электрического поля на расстоянии 80 см от центра сфер равна 230 В/м и направлена от центра, напряженность на расстоянии 40 см от центра равна 940 В/м и направлена к центру. Найти заряды обеих сфер и потенциалы поля на расстоянии от центра 80, 40 и 10 см.

3.159 В однородном электростатическом поле между двумя заряженными горизонтальными пластинами, расстояние между которыми равно 5 см, находится пылинка массой 10^{-8} г. Нижняя пластина заряжена до потенциала 8000 В, верхняя - до потенциала 2000 В. Каким зарядом обладает пылинка, если она находится в равновесии? Насколько нужно изменить потенциал нижней пластины, чтобы пылинка, потеряв заряд, равный заряду 1000 электронов, осталась в равновесии при неизменном заряде верхней пластины?

3.160 В однородном электростатическом поле между двумя заряженными горизонтальными пластинами, расстояние между которыми равно 2 см, находится заряженная пылинка массой 10^{-9} г, заряд пылинки равен $5\cdot10^{-19}$ Кл. Нижняя пластина заряжена до потенциала 900 В, верхняя − до 300 В. Найти время, в течение которого пылинка достигнет верхней пластины, если вначале она находилась посередине между пластинами.

3.161 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь каждой пластины $S = 200$ см^2, расстояние между ними $d_1 =$ 1,5 мм. Пластины раздвинули до расстояния $d_2 = 15$ мм. Найти энергию W_1 и W_2 конденсатора до и после раздвижения пластин, если перед раздвижением источник питания отключали.

3.162 К пластинам плоского воздушного конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 500$ В. Площадь каждой пластины $S = 200$ см^2, расстояние между ними $d_1 =$ 1,5 мм. Пластины раздвинули до расстояния $d_2 = 15$ мм. Найти энергию W_1 и W_2 конденсатора до и после раздвижения пластин, если перед раздвижением источник питания не отключали.

3.163 Плоский конденсатор емкостью 0,2 мкФ зарядили до напряжения 600 В. Определить изменение энергии конденсатора и работу внешних сил и сил поля при погружении конденсатора в керосин, если конденсатор подключен к источнику тока.

3.164 Плоский конденсатор емкостью 0,2 мкФ зарядили до напряжения 600 В. Определить изменение энергии конденсатора и работу внешних сил и сил поля при погружении конденсатора в керосин, если конденсатор отключен от источника тока.

3.165 Какое количество Q теплоты выделится при разряде плоского конденсатора, если напряжение между пластинами U = 15 кВ, расстояние d = 1 мм, диэлектрик – слюда? Площадь каждой пластины S = 300 см^2.

3.166 Конденсатор емкостью C_1 =1 мкФ был заряжен до разности потенциалов 100 В. После отключения от источника тока он был соединен параллельно с другим незаряженным конденсатором емкостью C_2 = 2 мкФ. Какое количество энергии первого конденсатора израсходуется на образование искры в момент присоединения второго конденсатора.

3.167 Шар емкостью 10 пФ заряжен до потенциала 6 кВ, а шар емкостью 20 пФ - до потенциала 12 кВ. Какое количество теплоты выделится при соединении этих шаров проволокой? Расстояние между шарами велико по сравнению с их размерами.

3.168 Пластины изолированного плоского конденсатора раздвигаются так, что его емкость изменяется от 100 до 80 пФ. Какая работа совершается при этом, если заряд конденсатора $1{,}6 \cdot 10^{4}$ Кл? Поле между пластинами остается однородным.

3.169 Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин 200 см^2 подсоединен к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E}$ = 220 В. Определить работу внешних сил по раздвижению пластин от d_1= 5 мм до d_2= 15 мм, если конденсатор не отключали от источника тока.

3.170 Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин 200 см^2 подсоединен к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E}$ = 220 В. Определить работу внешних сил по раздвижению пластин от d_1= 5 мм до d_2= 15 мм, если конденсатор перед раздвижением пластин отключали от источника тока.

3.171 Найти механическую работу, совершённую электрическими силами при повороте ручки настройки конденсатора переменной емкости, подключенного к батарее с ЭДС $\mathcal{E}$ = 300 В, если емкость изменяется от C_1 =10 мФ до C_2 = 100 мФ.

3.172 Расстояние между пластинами плоского конденсатора d_1 = 15 мм, разность потенциалов U = 1 кВ. Заряд конденсатора q = 100 нКл. Вычислить силу взаимного притяжения пластин и энергию поля конденсатора.

3.173 Сила притяжения пластин площадью S = 100 см^2 плоского конденсатора F = 100 мН. Диэлектрик – масло. Найти плотность энергии w поля конденсатора.

3.174 Определить энергию плоского конденсатора емкостью C = 150 пФ, которому сообщен заряд q = 50 нКл.

3.175 Вычислить силу взаимного притяжения пластин и энергию поля плоского конденсатора. Расстояние между пластинами конденсатора $d_1 = 0,5$ мм , разность потенциалов $U = 100$ В. Величина заряда каждой пластины 50 нКл.

3.176 Определить энергию плоского конденсатора емкостью $C = 150$ мкФ, который заряжен до разности потенциалов $\Delta\varphi = 1$ кВ.

3.177 Какая работа совершается внешними силами при раздвижении пластин изолированного плоского конденсатора, если его емкость изменяется от 100 до 20 пФ, а заряд конденсатора $1{,}6\cdot10^{4}$ Кл? Поле между пластинами остается однородным.

3.178 Какое количество теплоты выделится при соединении двух шаров проволокой? Емкость первого шара $C_1 = 100$ пФ ,его потенциал $\varphi = 6$ кВ, емкость второго $C_2 = 20$ пФ, его потенциал 18 кВ. Расстояние между шарами велико по сравнению с их размерами.

3.179 Найти плотность энергии w поля конденсатора, если сила притяжения пластин площадью $S = 10$ см^2 плоского конденсатора $F = 10$ мН. Диэлектрик − масло трансформаторное.

3.180 Найти энергию уединенной сферы радиусом $R = 1$ см, заряженной до потенциала $\varphi = 220$ В.

3.181 Найти энергию металлического шара радиусом $R = 1$ см, которому сообщен заряд $q = 50$ нКл.

3.182 Уединенной сфере радиусом $R = 5$ мм сообщен заряд $q = 150$ нКл. Найти энергию сферы.

3.183 Уединенная металлическая сфера емкостью $C = 100$ мкФ заряжена до потенциала $\varphi = 1$ кВ. Определить энергию поля, заключенного в сферическом слое, ограниченном сферой и концентрической с ней сферической поверхностью, радиус которой в два раза больше радиуса сферы.

3.184 Определить энергию поля, заключенного в сферическом слое, ограниченном сферой и концентрической с ней сферической поверхностью, радиус которой в три раза больше радиуса сферы. Емкость уединенной сферы $C = 2$ мкФ , потенциал $\varphi = 220$ В.

3.185 Металлический шар радиусом $R = 5$ мм несет заряд $q = 50$ нКл. Шар окружен слоем парафина толщиной $d = 1$ мм . Определить энергию электрического поля в слое диэлектрика.

3.186 Найти энергию W_1 и W_2 плоского воздушного конденсатора до и после раздвижения пластин, если перед раздвижением источник питания отключался. К пластинам конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 100$ В. Площадь каждой пластины $S = 100$ см^2, расстояние между ними $d_1 = 10$ мм. Пластины раздвинули до расстояния $d_2 = 15$ мм.

3.187 Определить изменение энергии плоского конденсатора и работу внешних сил и сил поля при погружении конденсатора в керосин, если конденсатор подключен к источнику тока. Емкость конденсатора 0,3 мкФ, разность потенциалов на обкладках – 400 В.

3.188 Определить изменение энергии плоского конденсатора и работу внешних сил и сил поля при погружении конденсатора в керосин, если конденсатор отключен от источника тока. Емкость конденсатора 0,3 мкФ, первоначальная разность потенциалов на обкладках – 400 В.

3.189 Найти объемную плотность энергии w поля плоского конденсатора, если сила притяжения пластин площадью $S = 150$ см^2 равна 200 мН. Диэлектрик – масло.

3.190 Найти объемную плотность энергии w электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $x = 2$ см от поверхности заряженного шара радиусом $R = 1{,}5$ см. Поверхностная плотность зарядов на шаре $\sigma = 167$ мкКл/м^2, а диэлектрическая проницаемость
среды $\varepsilon = 3$.

3.191 Найти объемную плотность энергии w электрического поля в точке, находящейся на расстоянии $x = 3$ см от бесконечно заряженной нити. Линейная плотность зарядов на нити $\tau = 167$ нКл/м, диэлектрическая проницаемость среды $\varepsilon = 2$.

3.192 Найти объемную плотность энергии w электрического поля в точке, находящейся вблизи бесконечной заряженной плоскости. Поверхностная плотность зарядов на плоскости $\sigma = 167$ мкКл/м^2, диэлектрическая проницаемость среды $\varepsilon = 3$.

3.193 Найти энергию W_1 и W_2 плоского воздушного конденсатора до и после раздвижения пластин, если перед раздвижением источник питания не отключался. К пластинам конденсатора приложена разность потенциалов $U_1 = 100$ В. Площадь каждой пластины $S = 100$ см^2, расстояние между ними $d_1 = 10$ мм. Пластины раздвинули до расстояния $d_2 = 15$ мм.

3.194 Пластину из эбонита толщиной $d = 1$ мм и площадью $S = 200$ см^2 поместили в однородное электрическое поле напряженностью $E = 1$ кВ/м. Найти: 1) плотность связанных зарядов на поверхности пластин; 2) энергию электрического поля, сосредоточенную в пластине. Пластина расположена так, что электрические силовые линии перпендикулярны ее плоской поверхности.

3.195 Пластину из эбонита толщиной $d = 1$ мм и площадью $S = 200$ см^2 поместили из поля напряженностью $E = 1$ кВ/м в область пространства, где внешнее поле отсутствует. Пластина расположена так, что электрические силовые линии перпендикулярны ее плоской поверхности. Пренебрегая уменьшением поля в диэлектрике с течением времени, определить энергию электрического поля в пластине.

3.196 Сплошной парафиновый шар радиусом $R = 1{,}5$ см заряжен равномерно по объему с объемной плотностью $\rho = 1$ нКл/м^3. Определить энергию W электрического поля, сосредоточенную в шаре.

3.197 Сплошной парафиновый шар радиусом R = 1,5 см заряжен равномерно по объему с объемной плотностью ρ = 1 нКл/м^3. Определить энергию W электрического поля, сосредоточенную вне шара.

3.198 Эбонитовый шар равномерно заряжен по объему. Во сколько раз энергия электрического поля вне шара превосходит энергию поля, сосредоточенную в шаре?

3.199 Уединенный металлический шар радиусом R = 3 мм несет некоторый заряд. Концентрическая этой сфере поверхность делит пространство на две части – внутреннюю конечную и внешнюю бесконечную – так, что энергии электрического поля обеих частей одинаковы. Определить радиус этой сферы.

3.200 Батарея конденсаторов сделана из семи слюдяных пластин толщиной 0,2 мм и площадью 200 см^2 каждая и восьми пластин станиоля (сплав). Начертить схему последовательного соединения. Найти емкость батареи и энергию батареи, если ее подключить к сети постоянного тока с напряжением 220 В.

3.201 Определить заряд , прошедший по проводу с сопротивлением R =10 Ом при равномерном нарастании напряжения на концах проводника с U_1 = 1 В до U_2 = 3 В в течение времени t = 10 с.

3.202 Сила тока в проводнике равномерно нарастает от I_1 = 0 до I_2 = 5 А в течение времени t = 5 с. Определить заряд q, прошедший в проводнике.

3.203 Сопротивление катушки из медной проволоки 16,8 Ом, масса проволоки 4,45 кг. Определить длину и площадь поперечного сечения проволоки.

3.204 Масса мотка медной проволоки 0,1 кг, ее сечение 0,1 мм^2. Определить сопротивление этой проволоки при температуре 393 К.

3.205 Источник тока с ЭДС $\mathcal{E}$ = 2,1 В находится на расстоянии 20 м от потребителя электрической энергии. Определить внутреннее сопротивление и напряжение на зажимах источника, если при сопротивлении потребителя 2 Ом сила тока в цепи равна 0,7 А. Проводка сделана из медного провода диаметром 1,2 мм.

3.206 Напряжение на клеммах источника тока U = 3,6 кВ. Потребитель находится на расстоянии l = 100 км. Какого сечения нужно взять медный провод для устройства двухпроводной линии передачи, если сила тока в линии I = 30 А и потери напряжения в проводах не должны превышать 3 %?

3.207 Напряжение на концах двух параллельно соединенных сопротивлений по 4 Ом каждый равно 6 В. Если одно из сопротивлений выключить, вольтметр показывает 8 В. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление источника.

3.208 Амперметр сопротивлением 3 Ом имеет предел измерения силы тока до 25 мА. Какой длины надо взять манганиновую проволоку диаметром 1 мм для изготовления шунта к амперметру, чтобы расширить пределы его измерения до 2,5 А?

3.209 Зашунтированный амперметр измеряет токи силой до 10 А. Какую наибольшую силу тока может измерить этот амперметр без шунта, если сопротивление амперметра $R_а$= 0,2 Ом и сопротивление шунта $R_ш$= 5 кОм?

3.210 Вольтметр, предназначенный для измерения напряжения до 100 В, имеет шкалу с 100 делениями. Его сопротивление R = 5 кОм. Какое сопротивление надо взять и как его подключить , чтобы этим вольтметром можно было измерять напряжение до 300 В?

3.211 Вольтметр, предназначенный для измерения напряжения до 100 В, имеет шкалу с 100 делениями. Его сопротивление R = 5 кОм. Какое сопротивление надо взять и как его подключить , чтобы этим вольтметром можно было измерять напряжение до 50 В?

3.212 Электрическая плитка мощностью 1 кВт с нихромовой спиралью предназначена для включения в сеть напряжением 220 В. Сколько метров проволоки диаметром 0,5 мм надо взять для изготовления спирали, если температура нити составляет 900 °С?

3.213 Определить ток короткого замыкания источника и ЭДС, если при внешнем сопротивлении R_1 = 50 Ом ток в цепи I_1 = 0,2 А, а при сопротивлении R_2 = 110 Ом величина тока I_2 = 0,1 А.

3.214 ЭДС батареи $\mathcal{E}$= 100 В, ее внутренне сопротивление r_1= 2 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность P = 150 Вт. Определить силу тока I в цепи, напряжение U, под которым находится внешняя цепь, и ее сопротивление R.

3.215 Батарея, ЭДС которой $\mathcal{E}$ = 100 В, а внутреннее сопротивление r = 1,5 Ом , питает внешнюю цепь, состоящую из двух параллельно соединенных проводников сопротивлениями R_1= 1 Ом и R_2= 10 Ом . Определить разность потенциалов на полюсах батареи и силу тока в проводниках.

3.216 Аккумуляторная батарея, замкнутая на реостат сопротивлением R_1 = 10 Ом, создает в нем ток I_1 = 1 А. Если сопротивление реостата увеличить в три раза, то ток станет I_2 = 0,3 А. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, а также силу тока короткого замыкания.

3.217 Двенадцать элементов, ЭДС каждого из которых $\mathcal{E}$ = 1,5 В и внутреннее сопротивление r = 0,5 Ом, соединены последовательно разноименными полюсами. Сопротивление внешней цепи R = 10 Ом. Определить силу тока в цепи.

3.218 Внутреннее сопротивление батареи аккумуляторов r_i= 0,5 Ом. Сколько процентов от точного значения ЭДС составляет ошибка, если, измеряя разность потенциалов на зажимах батареи вольтметром с сопротивлением R = 500 Ом, принять равной ее ЭДС?

3.219 К элементу с ЭДС $\mathcal{E}$ = 1,5 В присоединили катушку с сопротивлением R = 0,1 Ом. Сила тока при этом I_1 = 0,5 А. Когда к элементу присоединили последовательно еще один такой же элемент, то сила тока в катушке составила I_2 = 0,4 А. Определить внутреннее сопротивление первого и второго элементов.

3.220 Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. ЭДС каждого элемента $\mathcal{E}$ = 1,5 В, внутреннее сопротивление r_i= 0,1 Ом. Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление R = 1 Ом. Найти силу тока во внешней цепи.

3.221 Двенадцать элементов, ЭДС каждого из которых $\mathcal{E}$ = 1,5 В и внутреннее сопротивление r = 0,5 Ом, соединены параллельно одноименными полюсами. Сопротивление внешней цепи R = 10 Ом. Определить силу тока во внешней цепи.

3.222 К железному проводу длиной l_1 = 1,6 м и поперечным сечением S_1 = 1 мм^2 параллельно присоединен никелиновый провод длиной l_2= 1,2 м и поперечным сечением S_2 = 2 мм^2. Определить силу тока в железном проводе, если в никелиновом сила тока I_2= 0,5 А.

3.223 Лампа накаливания потребляет ток, равный 0,6 А. Температура вольфрамовой нити диаметром 0,1 мм равна 2200 $^\circ$С. Ток подводится медным проводом сечением 6 мм^2. Определить напряженность электрического поля: 1) в вольфраме; 2) в меди.

3.224 Какую долю ЭДС элемента составляет разность потенциалов на его зажимах, если сопротивление элемента r в n раз меньше внешнего сопротивления R. Задачу решить для а) n = 0,1 ; б) n = 1; в) n = 10.

3.225 Считая сопротивление вольтметра R_v бесконечно большим, определяют сопротивление R по показаниям амперметра и вольтметра. Найти относительную погрешность $\Delta R/R$ найденного сопротивления, если в действительности сопротивление вольтметра
R_v= 1500 Ом. Задачу решить для R = 10 Ом, R = 100 Ом, R = 1000 Ом.

3.226 В цепи (рисунок 13) R_1 = R_4 = 30 Ом, R_2 = R_5 = 60 Ом, R_3 = 20 Ом, U= 120 В. Определить эквивалентное сопротивление всей цепи и силу тока во всех сопротивлениях.

3.227 В цепи (рисунок 14) R_1 = 10 Ом, R_2 = 15 Ом, R_3 = 25 Ом, R_4 = 50 Ом, R_5 = 5 Ом и сила тока I_1 = 2 А. Определить силу тока в цепи и во всех ветвях, а также общее напряжение.

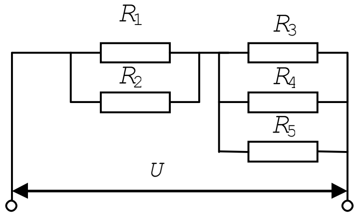

Рисунок 13

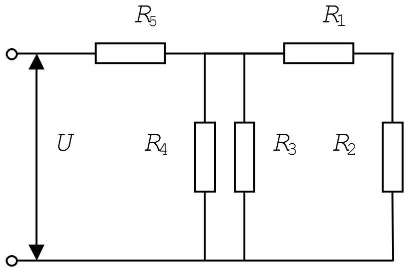

Рисунок 14

3.228 В цепи (рисунок 15) R_1 = 2 Ом, R_2 = 3 Ом, R_3 = 6 Ом, R_4 = 7 Ом и U = 36 В. Определить силу тока на участке CD, если R_{CD} = 0.

3.229 В цепи (рисунок 15) R_1 = 1 Ом, R_2 = 5 Ом, R_3 = 20 Ом, R_4 = 5 Ом и U_{AB} = 30 В. Определить сопротивление на участке CD, если известно, что по сопротивлению R_2 протекает ток силой 4 А.

3.230 На рисунке 16 $R_1 = R_2$ = 50 Ом, R_3 = 100 Ом, C = 50 нФ. Определить ЭДС источника, пренебрегая его внутренним сопротивлением, если заряд на конденсаторе q = 2,2 мкКл.

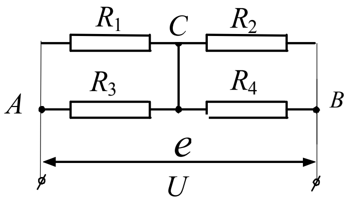

Рисунок 15

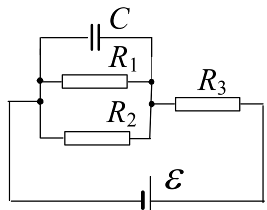

Рисунок 16

3.231 Два параллельно соединенных элемента (рисунок 17) с одинаковыми ЭДС $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$ = 1,5 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 0,1 Ом и r_2 = 0,15 Ом замкнуты на внешнее сопротивление R_3 = 1 Ом. Найти ток в каждом из элементов и во всей цепи.

3.232 Два последовательно соединенных элемента (рисунок 18) с одинаковыми ЭДС $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$ = 1,5 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 0,1 Ом и r_2 = 0,15 Ом замкнуты на внешнее сопротивление R_3 = 1 Ом. Найти разность потенциалов на зажимах элементов.

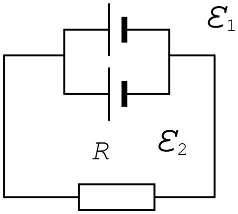

Рисунок 17

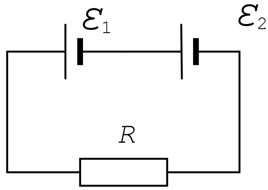

Рисунок 18

3.233 Напряжение на зажимах элемента замкнутой цепи (рисунок 19) U = 2,1 В. Сопротивления R_1 = 1 Ом, R_2 = 3 Ом, R_3 = 5 Ом. Какой ток I протекает через сопротивление R_3?

3.234 Сопротивления R_2 = 10 Ом, R_3 = 5 Ом (рисунок 20). Через сопротивление R_2 течет ток I_2 = 0,5 А. Через сопротивление R_4 течет ток I = 1,0 А. Найти сопротивление R_1.

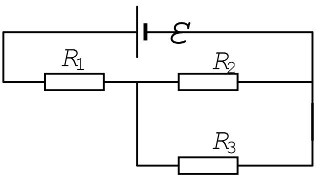

Рисунок 19

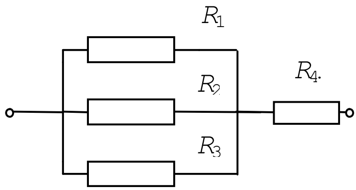

Рисунок 20

3.235 В цепи (рисунок 21) сопротивления R_1 = R_3 = R_4 = 30 Ом, R_2 = R_5 = 60 Ом, R_6 = 20 Ом, напряжение на клеммах источника тока U = 120 В. Определить эквивалентное сопротивление всей цепи и силу тока во всех сопротивлениях.

3.236 Вычислить сопротивление R графитового проводника, изготовленного в виде прямого кругового усеченного конуса длиной l = 50 см и радиусами оснований R_1 = 10 мм и R_2 = 5 мм. Температура проводника t = 20 °С.

3.237 Найти силу тока, протекающего через резистор R_1 участка цепи (рисунок 22), 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.

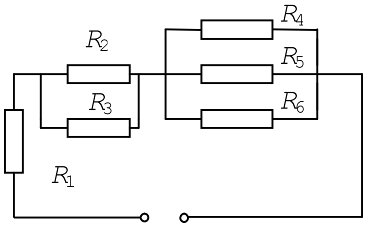

Рисунок 21

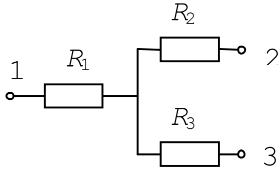

Рисунок 22

3.238 На одном конце цилиндрического медного проводника сопротивлением R_0= 10 Ом (при 0 °С) поддерживается температура t_1 = 20 °С, на другом t_2 = 400 °С. Найти сопротивление проводника, считая градиент температуры вдоль его оси постоянным.

3.239 Проволочный куб составлен из проводников. Сопротивление каждого проводника, составляющего ребро куба, R_i= 1 Ом. Вычислить сопротивление R этого куба, если он включен в электрическую цепь, как показано на рисунке 23.

3.240 Проволочный куб составлен из проводников. Сопротивление каждого проводника, составляющего ребро куба, R_i= 1 Ом. Вычислить сопротивление R этого куба, если он включен в электрическую цепь, как показано на рисунке 24.

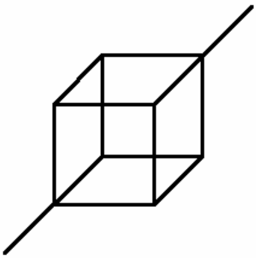

Рисунок 23

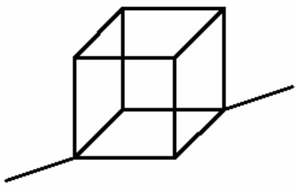

Рисунок 24

3.241 Два источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_1$ = 2 В и $\mathcal{E}_2$ = 1,5 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 0,5 Ом и r_2 = 0,4 Ом включены параллельно сопротивлениям R_1 = 2 Ом и R_2 = 5 Ом (рисунок 25). Определить силу тока через эти сопротивления.

3.242 На рисунке 26 $\mathcal{E}_1$= $\mathcal{E}_2$= $\mathcal{E}_3$, R_1 = 48 Ом, R_2 = 24 Ом, падение напряжения U_2 на сопротивлении R_2 равно 12 В. Пренебрегая внутренним сопротивлением элементов, определить: 1) силу тока во всех участках цепи; 2) сопротивление R_3.

3.243 На рисунке 26 элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1$=2 В, $\mathcal{E}_2$=3 В, $\mathcal{E}_3$=4 В, сопротивления R_1 = 4 Ом, R_2 = 2 Ом, R_3= 6 Ом . Определить силу тока во всех участках цепи.

3.244 Батареи имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3$=12 В, R_1 = 40 Ом, R_2 = 24 Ом (рисунок 26). При коротком замыкании верхнего узла схемы с отрицательным зажимом батарей через замыкающий провод течет ток I = 2А. Определить: 1) силу тока во всех участках цепи; 2) сопротивление R_3.

3.245 В цепи, изображенной на рисунке 26, токи I_1 и I_3 направлены справа налево, а ток I_2 – сверху вниз. Падения напряжения на сопротивлениях R_1, R_2 и R_3 равны $U_1 = U_3 = 2U_2$= 20 В. Определить ЭДС $\mathcal{E}_2$ и $\mathcal{E}_3$, если $\mathcal{E}_1$= 30 В.

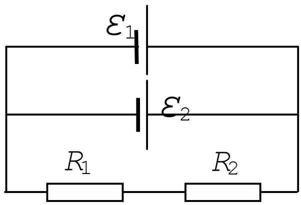

Рисунок 25

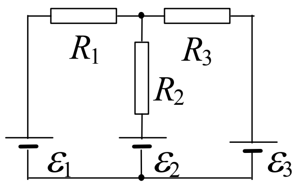

Рисунок 26

3.246 Две батареи аккумуляторов ($\mathcal{E}_1$ = 10 В, r_1 = 1 Ом; $\mathcal{E}_2$ = 8 В, r_2 = 2 Ом) и реостаты (R_1 = 1 Ом, R_2 = 2 Ом, R_3 = 6 Ом) соединены, как показано на рисунке 27. Найти силу тока в батарее и реостатах.

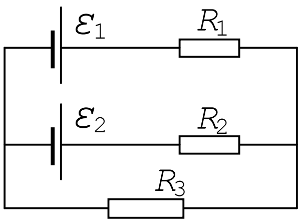

Рисунок 27

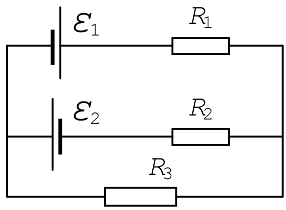

Рисунок 28

3.247 Две батареи аккумуляторов ($\mathcal{E}_1$= 10 В, r_1 = 1 Ом; $\mathcal{E}_2$= 8 В, r_2 = 2 Ом) и реостаты (R_1 = 1 Ом, R_2 = 2 Ом, R_3 = 6 Ом) соединены, как показано на рисунке 28. Найти силу тока в батарее и реостатах.

3.248 Две батареи аккумуляторов ($\mathcal{E}_1$= 10 В, r_1 = 1 Ом; $\mathcal{E}_2$= 8 В, r_2 = 2 Ом) и реостат (R = 6 Ом) соединены, как показано на рисунке 29. Найти силу тока в батарее и реостате.

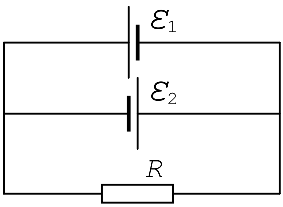

Рисунок 29

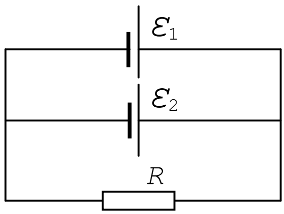

Рисунок 30

3.249 Два источника тока ($\mathcal{E}_1$ = 8 В, r_1 = 2 Ом; $\mathcal{E}_2$ = 6 В, r_2 = 1,5 Ом) и реостат (R = 10 Ом) соединены, как показано на рисунке 30. Найти силу тока, текущего через реостат.

3.250 Три батареи с $\mathcal{E}_1$ = 12 В, $\mathcal{E}_2$ = 5 В и $\mathcal{E}_3$ = 10 В и одинаковыми внутренними сопротивлениями r = 1 Ом, соединены между собой одноименными полюсами. Сопротивление соединительных проводов ничтожно мало. Определить силы токов, идущих через каждую батарею.

3.251 Три источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_1$ = 11 В, $\mathcal{E}_2$ = 4 В и $\mathcal{E}_3$ = 6 В с пренебрежимо малыми внутренними сопротивлениями и три реостата с сопротивлениями R_1 = 5 Ом, R_2 = 10 Ом и R_3 = 2 Ом соединены, как показано на рисунке 31. Определить силы токов в реостатах.

3.252 Определить величину общего тока в цепи (рисунок 32) и падения напряжения на внешних сопротивлениях, если $\mathcal{E}_1$ = 100 В, $\mathcal{E}_2$ = 75 В и $\mathcal{E}_3$ = 50 В, r_1 = 0,1 Ом, r_2 = 0,3 Ом, r_3 = 0,1 Ом, R_1 = 5 Ом,

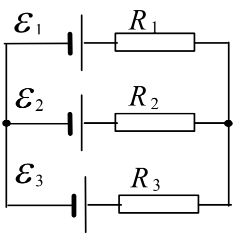

Рисунок 31

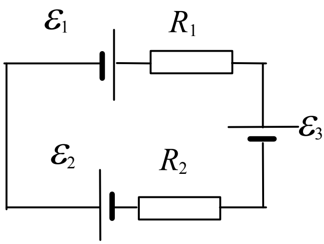

Рисунок 32

3.253 В цепи (рисунок 33) $\mathcal{E}$ = 3 В, r = 0,8 Ом, R_1 = 0,6 Ом, R_2 = 2 Ом и R_3 = 8 Ом. Найти величины токов в отдельных сопротивлениях.

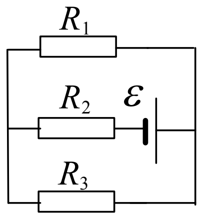

Рисунок 33

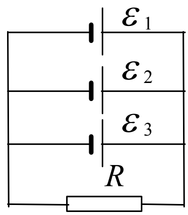

Рисунок 34

3.254 Найти величину тока, проходящего через каждый из элементов (рисунок 34), внутренние сопротивления которых одинаковы и равны 0,3 Ом, а $\mathcal{E}_1$ = 1,3 В, $\mathcal{E}_2$ = 1,4 В и $\mathcal{E}_3$ = 1,5 В, R = 0,6 Ом.

3.255 Три источника с ЭДС $\mathcal{E}_1$ = 10 В, $\mathcal{E}_2$ = 5 В, $\mathcal{E}_3$ = 6 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 0,1 Ом, r_2 = 0,2 Ом, r_3 = 0,1 Ом соединены, как показано на рисунке 35. Определить напряжения на сопротивлениях R_1 = 5 Ом, R_2 = 1 Ом и R_3 = 3 Ом.

3.256 Найти величины токов во всех участках цепи (рисунок 36), если $\mathcal{E}_1$ = 24 В, $\mathcal{E}_2$ = 18 В, R_1 = 20 Ом, R_2 = R_3 = 2 Ом. Найти величины токов в отдельных сопротивлениях. Внутренние сопротивления источников ЭДС не учитывать.

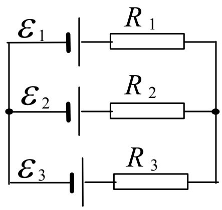

Рисунок 35

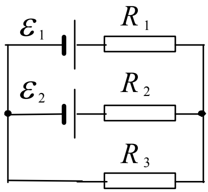

Рисунок 36

3.257 На рисунке 37 $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$, R_1 = 50 Ом, R_2 = 25 Ом, падение напряжения U_2 на сопротивлении R_2 равно 10 В. Пренебрегая внутренним сопротивлением элементов, определить: 1) силу тока во всех участках цепи; 2) сопротивление R_3.

3.258 На рисунке 38 $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3$, R_1 = 48 Ом, R_2 = 24 Ом, падение напряжения U_2 на сопротивлении R_2 равно 12 В. Пренебрегая внутренним сопротивлением элементов, определить силу тока во всех участках цепи.

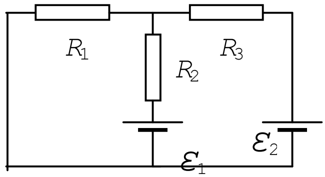

Рисунок 37

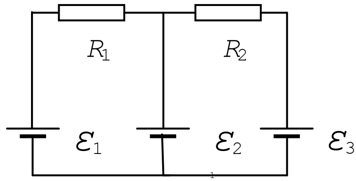

Рисунок 38

3.259 На рисунке 39 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, R_1 = 50 Ом, R_2 = 25 Ом, падение напряжения U_2 на сопротивлении R_2 равно 10 В. Пренебрегая внутренним сопротивлением элементов, определить: 1) силу тока во всех участках цепи; 2) сопротивление R_3.

3.260 Два одинаковых элемента имеют ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ = 2 В и внутренние сопротивления $r_1 = r_2$ = 0,2 Ом (рисунок 40). Найти токи I_1 и I_2, текущие через сопротивления R_1 = 2 Ом и R_2 = 4 Ом.

3.261 Два одинаковых элемента имеют ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ = 2 В и внутренние сопротивления $r_1 = r_2$ = 0,2 Ом (рисунок 40). Сопротивления R_1 = 2 Ом и R_2 = 4 Ом. Найти ток I через элемент ε_1.

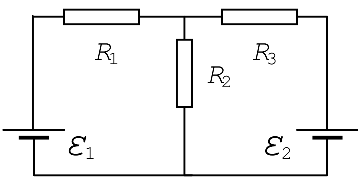

Рисунок 39

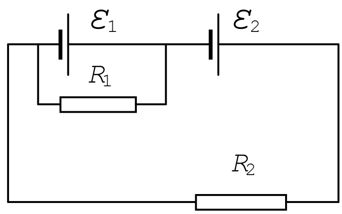

Рисунок 40

3.262 Элементы имеют ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, сопротивления $R_1 = 2R_2$ (рисунок 41). Во сколько раз ток, текущий через вольтметр, больше тока, текущего через сопротивление R_2?

3.263 Элементы имеют ЭДС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ = 100 В, сопротивления $R_1 = R_2$ = 400 Ом, сопротивление вольтметра R_v = 1000 Ом (рисунок 41). Найти показания вольтметра.

3.264 На схеме, показанной на рисунке 41, элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$, сопротивления $R_1 = R_2 = 50$ Ом . Сопротивление вольтметра $R_v = 100$ Ом, показания вольтметра $U = 120$ В. Найти ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ элементов.

3.265 Три сопротивления $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 1$ Ом и $R_3 = 3$ Ом, а также источник тока $\mathcal{E} = 1{,}4$ В соединены, как показано на рисунке 42. Определить ЭДС источника тока, который надо подключить в цепь между точками A и B, чтобы в сопротивлении R_3 шел ток силой $I = 1$ А в направлении сверху вниз. Сопротивлением источника тока пренебречь.

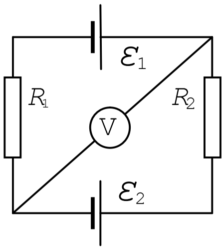

Рисунок 41

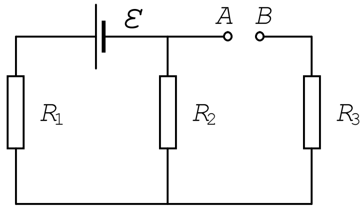

Рисунок 42

3.266 Три источника с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 10$ В, $\mathcal{E}_2 = 5$ В, $\mathcal{E}_3 = 6$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0{,}1$ Ом, $r_2 = 0{,}2$ Ом, $r_3 = 0{,}1$ Ом соединены между собой одноименными полюсами. Определить силу токов, идущих через батареи. Сопротивлением проводов пренебречь.

3.267 Элементы с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 15$ В, $\mathcal{E}_2 = 10$ В включены в цепь , как показано на рисунке 43. Сопротивления $R_1 = 1$ Ом, $R_2 = 2$ Ом, $R_3 = 3$ Ом и $R_4 = 4$ Ом. Определить силу токов в сопротивлениях R_2 и R_4. Внутренними сопротивлениями элементов пренебречь.

3.268 Два элемента с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 1{,}2$ В и $\mathcal{E}_2 = 0{,}9$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0{,}1$ Ом и $r_2 = 0{,}3$ Ом соединены одноименными полюсами. Сопротивление соединительных проводов $R = 0{,}2$ Ом. Определить силу тока в цепи.

3.269 Два элемента с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 1{,}5$ В и $\mathcal{E}_2 = 0{,}6$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0{,}2$ Ом и $r_2 = 0{,}4$ Ом соединены одноименными полюсами. Сопротивление соединительных проводов $R = 0{,}2$ Ом. Определить силу тока в цепи.

3.270 Два источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 1$ В и $\mathcal{E}_2 = 1{,}5$ В и внутренними сопротивлениями $r_1 = 0{,}1$ Ом и $r_2 = 0{,}2$ Ом соединены между собой, как показано на рисунке 44. Сопротивления $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 3$ Ом , $R_3 = 1$ Ом. Сопротивление амперметра $R_A = 2$ Ом. Найти показания амперметра.

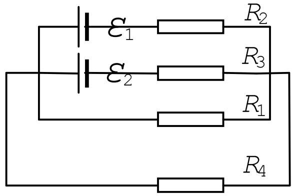

Рисунок 43

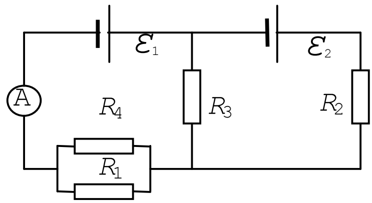

Рисунок 44

3.271 Элементы с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 2$ В, $\mathcal{E}_2 = 1$ В включены в цепь, как показано на рисунке 45. Сопротивления $R_1 = 30$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 10$ Ом. Определить силу токов во всех участках цепи. Внутренними сопротивлениями элементов пренебречь.

3.272 Элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = 100$ В и $\mathcal{E}_2 = 220$ В, сопротивления $R_1 = R_2 = 200$ Ом, $R_3 = 400$ Ом (рисунок 46). Найти показание амперметра.

3.273 Элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = 2$ В и $\mathcal{E}_2 = 4$ В, сопротивление $R_1 = 0{,}5$ Ом (рисунок 46). Падение потенциала на сопротивлении R_2 равно $U = 1$ В (ток через R_2 направлен справа налево). Найти показание амперметра.

3.274 Элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = 20$ В и $\mathcal{E}_2 = 4$ В, сопротивление $R_2 = 10$ Ом и $R_3 = 20$ Ом (рисунок 46). Через амперметр течет ток $I = 1$ А, направленный от R_3 к R_1. Найти сопротивление R_1.

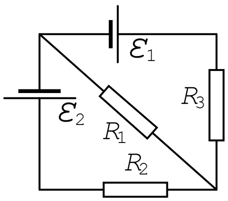

Рисунок 45

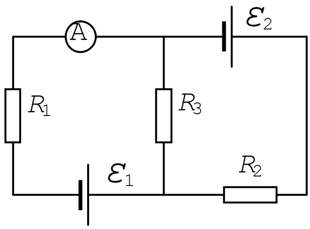

Рисунок 46

3.275 Элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = 12$ В и $\mathcal{E}_2 = 6$ В, сопротивления $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 2$ кОм и $R_3 = 0{,}5$ кОм (рисунок 47), сопротивление амперметра $R_A = 10$ Ом. Найти показание амперметра.

3.276 Элементы имеют ЭДС $\mathcal{E}_1 = 12$ В и $\mathcal{E}_2 = 6$ В, сопротивление $R_3 = 0{,}5$ кОм (рисунок 47), сопротивление амперметра $R_A = 10$ Ом. Падение потенциала на сопротивлении R_2 равно $U_2 = 1$ В (ток через R_2 направлен сверху вниз). Найти показание амперметра.

3.277 Найти токи I_i в различных ветвях мостика Уитстона (рисунок 48) при условии, что через гальванометр течет ток $I_G = 0$. ЭДС элемента $\mathcal{E}$ = 1,5 В , сопротивления R_1 = 30 Ом, R_2 = 20 Ом , R_3 = 10 Ом.

3.278 На схеме , показанной на рисунке 48, $\mathcal{E}$ = 2 В, R_1 = 60 Ом, R_2 = 40 Ом, $R_3 = R_4$ = 20 Ом и R_G = 100 Ом. Определить силу тока I_G, протекающего через гальванометр.

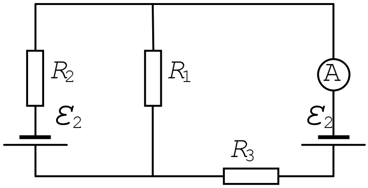

Рисунок 47

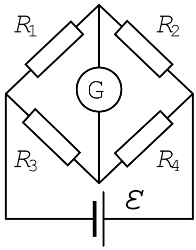

Рисунок 48

3.279 На рисунке 49 $\mathcal{E}_1$ = 10 В, $\mathcal{E}_2$ = 20 В, $\mathcal{E}_3$ = 40 В, а сопротивления $R_1 = R_2 = R_3$ = 10 Ом. Определить силу токов, протекающих через сопротивления и источники ЭДС. Внутренние сопротивления источников ЭДС не учитывать.

3.280 Элементы с ЭДС $\mathcal{E}_1$ = 12 В, $\mathcal{E}_2$ = 6 В и $\mathcal{E}_3$ = 3 В включены в цепь, как показано на рисунке 50. Внутренние сопротивления элементов r_1 = 0,1 Ом, r_2 = 0,2 Ом, r_3 = 0,3 Ом, сопротивления R_1 = 5 Ом, R_2 = 1 Ом , R_3 = 3 Ом и R_4 = 2 Ом. Определить силу токов в сопротивлениях R_1, R_2, R_3 и R_4.

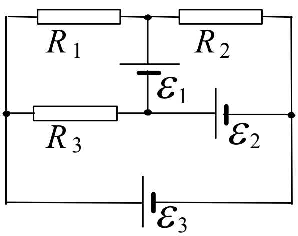

Рисунок 49

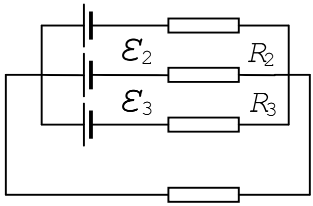

Рисунок 50

3.281 Найти сечение S медных проводов, которые используются для передачи мощности P = 8 кВт на расстояние 90 м при напряжении на нагрузке U = 110 В. Потери мощности в двухпроводной линии не превышают 5 %.

3.282 При каком сопротивлении R внешней цепи источник с ЭДС $\mathcal{E}$ = 10 В и внутренним сопротивлением r = 20 Ом будет отдавать максимальную мощность? Каково значение P_{max} этой мощности?

3.283 Какая мощность выделяется в единице объёма алюминиевого проводника длиной 2 м, если на его концах поддерживается разность потенциалов 4 В?

3.284 Какая мощность выделяется в единице объема проводника длиной l = 2 м, если на его концах поддерживается разность потенциалов U= 12 В? Удельное сопротивление материала проводника $\rho = 10^{6}$ Ом·м.

3.285 Лифт массой 0,8 т поднимается вверх на высоту 40 м за 0,5 мин. Определить мощность, потребляемую электродвигателем лифта, и силу тока в электродвигателе, если напряжение на его зажимах равно 120 В, а КПД = 90 %.

3.286 Чтобы лампа мощностью 60 Вт, рассчитанная на напряжение 120 В, давала нормальный накал при напряжении в сети 220 В, последовательно к ней присоединили нихромовую проволоку длиной 10 м. Найти диаметр проволоки.

3.287 Как следует изменить сопротивление нагревателя для того, чтобы время, необходимое на превращение 200 г льда в пар, оказалось равным времени превращения 100 г льда в пар? Рассмотреть два случая: а) U = const; 2) I = const. Удельная теплота парообразования воды r = 2,25 МДж/кг, удельная теплота плавления льда λ = 0,33 МДж/кг.

3.288 Спираль калориметра сопротивлением 60 Ом и резистор сопротивлением 40 Ом соединены параллельно и замкнуты на источник с ЭДС $\mathcal{E}$ = 120 В и внутренним сопротивлением 6 Ом. На сколько градусов нагреется в калориметре 0,5 кг воды за 6 мин ?

3.289 В цепь из медного провода с сечением 3 мм^2 включен свинцовый предохранитель с поперечным сечением 1 мм^2. На какое повышение температуры провода рассчитан этот предохранитель? Начальная температура свинца 290 К. Теплоотдачей в окружающую среду пренебречь. Температура плавления свинца 600 К. Удельная теплота плавления 30 кДж/кг.

3.290 Два проводника одинаковой длины и одинакового сечения, один из меди, а другой из железа, соединены параллельно. Определить отношение мощностей токов для этих проводников.

3.291 Сила тока в проводнике сопротивлением 120 Ом равномерно возрастает от I_0 = 0 до I_{max} = 5 А за время t = 15 с. Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за это время.

3.292 Сила тока в проводнике сопротивлением R = 100 Ом равномерно убывает от I_0 = 10 А до I= 0 за время t = 30 с. Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за это время.

3.293 В проводнике за время t = 10 с при равномерном возрастании силы тока от I_0= 1 А до I= 5 А выделилось количество теплоты Q = 10 кДж. Найти сопротивление R проводника.

3.294 Сила тока в проводнике, имеющем сопротивление R = 15 кОм, изменяется по закону $I = I_o e^{-at}$, где I_0 = 10 А, a = 10^2 $с^{-1}$. Определить количество теплоты Q, выделившееся за время t = 0,1 с.

3.295 Определить напряженность электрического поля в алюминиевом проводнике объемом V = 10 $см^3$, если при прохождении по нему постоянного тока за время t = 5 мин выделилось количество теплоты Q = 2,3 кДж.

3.296 Электронагревательные приборы, на панели которых указано U_1 = 220 В и P_1 = 600 Вт, U_2 = 220 В и P_2 = 400 Вт, включены последовательно в цепь с напряжением 220 В. Какая мощность будет выделяться в каждом из них?

3.297 При силе тока 10 А во внешней цепи выделяется мощность 200 Вт, а при силе тока 15 А - 240 Вт. Каковы внутреннее сопротивление, ЭДС и сила тока короткого замыкания генератора?

3.298 Два провода изготовлены из одного и того же материала, имеют одинаковую длину, но диаметр одного вдвое больше другого. В каком проводе выделится больше теплоты и во сколько раз: 1) при одинаковом напряжении на концах проводов; 2) при одинаковой силе тока в проводах?

3.299 К аккумулятору с внутренним сопротивлением 1 Ом подключена проволока сопротивлением 4 Ом, а затем параллельно ей такая же проволока. Во сколько раз изменится количество теплоты, выделяющееся в первой проволоке, после подключения второй?

3.300 Имеются две проволоки квадратного сечения, изготовленные из одного и того же материала. Сторона сечения одной проволоки равна 1 $мм^2$, а другой – 4 $мм^2$. Для того чтобы расплавить первую проволоку, нужно пропустить через нее ток I_1 = 10 А. Какой ток I_2 нужен, чтобы расплавить вторую проволоку? Теплоотдачей в окружающую среду пренебречь.

3.301 Электрический чайник с 600 г воды при 18 °С, сопротивление обмотки которого при накале равно 20 Ом, забыли выключить. Через сколько времени после включения вся вода выкипит? Напряжение сети равно 220 В, КПД чайника – 60 %. Удельная теплота парообразования – 2,26 МДж/кг.

3.302 Какого сечения необходимо взять свинцовый предохранитель, если известно, что он должен плавиться при повышении на 10 °С температуры проводки, выполненной из медного провода сечением 5 $мм^2$? Начальная температура проводки 20 °С. Теплоотдачей в окружающую среду пренебречь. Температура плавления свинца 600 К. Удельная теплота плавления свинца 30 кДж/кг.

3.303 Электрический чайник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в чайнике начинает кипеть через 10 мин, при включении другой – через 20 мин. Через какое время после включения закипит вода в чайнике, если включить обе обмотки: 1) последовательно; 2) параллельно?

3.304 Нихромовую проволоку длиной 20 м включили последовательно с лампой мощностью 40 Вт, чтобы лампа, рассчитанная на напряжение 120 В, давала нормальный накал при напряжении в сети 220 В. Найти диаметр этой проволоки.

3.305 Лампочка и реостат, соединенные последовательно, присоединены к источнику тока. Напряжение на зажимах лампочки равно 40 В, сопротивление реостата равняется 10 Ом. Внешняя цепь потребляет мощность 120 Вт. Найти силу тока в цепи.

3.306 При токе 3 А во внешней цепи батареи аккумуляторов выделяется мощность 18 Вт, а при токе 1 А – 10 Вт. Определить внутреннее сопротивление, ЭДС и силу тока короткого замыкания батареи.

3.307 Сила тока в проводнике изменяется со временем по закону $I = I_0 \exp(-\alpha t)$, где $I_0 = 20$ А, $\alpha = 10$ с$^{-1}$. Определить количество теплоты, выделившееся в проводнике за 1 с, если его сопротивление $R = 100$ Ом.

3.308 Источник тока при замыкании на сопротивление $R = 5$ Ом даёт ток силой $I = 3$ А; сила тока короткого замыкания $I_{кз} = 10$ А. Определить наибольшую полезную мощность, которую может дать источник.

3.309 Какая наибольшая мощность P может выделиться на подключенном к батарее резисторе с переменным сопротивлением, если батарея, ЭДС которой $\mathcal{E} = 10$ В, может дать наибольшую силу тока $I_{max} = 5$ А.

3.310 К зажимам батареи аккумуляторов присоединен нагреватель. ЭДС батареи $\mathcal{E} = 24$ В, внутреннее сопротивление $r = 1$ Ом. Нагреватель, включенный в цепь, потребляет мощность $P = 100$ Вт. Вычислить силу тока в цепи и КПД нагревателя.

3.311 К батарее, ЭДС которой $\mathcal{E} = 12$ В и внутреннее сопротивление $r = 0{,}5$ Ом, присоединен проводник. Определить: 1) при каком сопротивлении проводника мощность, выделяемая в нем, максимальна? 2) как велика при этом мощность, выделяемая в проводнике?

3.312 ЭДС батареи $\mathcal{E} = 20$ В. Сопротивление внешней цепи $R = 1$ Ом, сила тока $I = 4$ А. С каким КПД работает батарея? При каком значении внешнего сопротивления КПД будет равен 95 %?

3.313 Воду объемом $V = 10$ л можно вскипятить, затратив электрическую энергию $W = 0{,}5$ кВт·ч. Начальная температура воды $t_0 = 20$ °С. Найти КПД нагревателя.

3.314 Для отопления комнаты пользуются электрической печью, включенной в сеть напряжением $U = 220$ В. Комната теряет в сутки количество теплоты $Q = 90$ МДж.

Требуется поддерживать температуру комнаты постоянной. Найти: а) сопротивление R печи; б) мощность P печи.

3.315 В ртутном диффузионном насосе в минуту испаряется 100 г ртути. Каково должно быть сопротивление R нагревателя насоса, если он включается в сеть напряжением $U = 220$ В? Удельная теплота парообразования ртути $r = 288$ кДж/кг.

3.316 Во сколько раз изменится плотность тока насыщения вольфрама, находящегося при температуре 2400 К, если его температуру повысить на 200 К? Работа выхода электрона для вольфрама равна 4,5 эВ.

3.317 Во сколько раз катод из торированного вольфрама при рабочей температуре 2000 К обладает большей удельной электронной эмиссией, чем катод из чистого вольфрама при той же температуре? Эмиссионную постоянную для чистого вольфрама считать равной 60 А/(см$^2 \cdot$ К^2), а для торированного вольфрама — 3 А/(см$^2 \cdot$ К^2). Работа выхода электрона для чистого вольфрама равна 4,5 эВ, для торированного – 2,63 эВ.

3.318 Азот ионизируется рентгеновским излучением. Найти удельную проводимость азота, если в одном кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия 10^7 пар одновалентных ионов.

3.319 В ионизационной камере с расстоянием между плоскими электродами $d = 5$ см установился ток насыщения плотностью $j = 16$ мкА/м^2. Определить число n пар ионов, образующихся в каждом кубическом сантиметре пространства камеры в 1 с.

3.320 В электронной лампе ток насыщения достигает 2,86 мА при температуре вольфрамового волоска катода 2000 К. Найти диаметр волоска катода, если его длина равна 2 см. Эмиссионную постоянную для вольфрама считать равной 60 А/(см$^2 \cdot$ К^2). Работа выхода электрона для вольфрама равна 4,5 эВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(*справочное*)

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

1 Некоторые физические постоянные (округленные значения)

Скорость света в вакууме	$c = 3{\cdot}10^{8}$ м/с
Гравитационная постоянная	$G = 6{,}67{\cdot}10^{-11}$ Н·м^2·кг$^{-2}$
Нормальное ускорение свободного падения	$g = 9{,}81$ м/с^2
Постоянная Авогадро	$N_A = 6{,}02{\cdot}10^{23}$ моль$^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8{,}31$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}38{\cdot}10^{-23}$ Дж/К
Объём 1 моля газа при нормальных условиях	$V_\mu = 22{,}4{\cdot}10^{-3}$ м^3/моль
Элементарный электрический заряд	$q = 1{,}6{\cdot}10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	$m_e = 9{,}1{\cdot}10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1{,}67{\cdot}10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85{\cdot}10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 4\pi{\cdot}10^{-7}$ Гн/м
Магнетон Бора	$\mu_Б = 9{,}27{\cdot}10^{-24}$ Дж/Тл
Постоянная Планка	$h = 6{,}63{\cdot}10^{-34}$ Дж·с

2 Плотность твёрдых тел и жидкостей

Вещество	ρ, 10^3 кг/м^3	Вещество	ρ, 10^3 г/м^3
Алюминий	2,71	Вода (при 4 ^{0}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 °С) и температурный коэффициент α проводников

Вещество	ρ_0, 10^{-8} Ом·м	α, 10^{-4} $^0C^{-1}$
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 кваратный метр	Кл/м^2
Объемная плотность заряда	ρ	кулон на кубический метр	Кл/м^3

Окончание таблицы

Наименование величины и ее условное обозначение		Название единицы измерения в СИ и ее сокращенное обозначение	
Электрический момент	p	кулон- метр	Кл·м
Напряженность электрического поля	E	ньютон на кулон вольт на метр	Н/Кл 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
Поляризуемость	α	кубический метр	м^3
Диэлектрическая восприимчивость	χ	величина безразмерная	– –
Диэлектрическая проницаемость	ε	величина безразмерная	– –
Электрическое сопротивление	R	ом	Ом
Удельное сопротивление	ρ	ом-метр	Ом·м
Удельная проводимость	γ	сименс	См
Магнитная индукция	B	тесла	Тл
Напряженность магнитного поля	H	ампер на метр	А/м
Магнитный момент	p_m	ампер-квадратный метр	А·м^2
Магнитный поток	Φ_B	вебер	Вб
Индуктивность	L	генри	Гн
Намагниченность	J	ампер на метр	А/м
Магнитная восприимчивость	χ	величина безразмерная	–
Магнитная проницаемость	μ	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}

ОГЛАВЛЕНИЕ

Учебное издание

БУЙ Михаил Владимирович
ПРИХОДЬКО Иван Васильевич
ПАВЛЕНКО Александр Петрович

Ф И З И К А
Часть 3
Электричество

Учебно-методическое пособие
для студентов инженерно-технических специальностей ФБО

Редактор Н. А. Дашкевич
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 12.10.2009 г. Формат 60х84 $^{1}/_{16}$.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л.4,72. Тираж 1000 экз.
Зак.№ 2796. Изд. № 116.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0552508 от 09.07.2009 г.
ЛП № 02330/0494150 от 03.04.2009 г.
246653, г. Г Кирова, 34.