МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА

Кафедра физики

А.С. СТРОГИЙ, М.В. БУЙ, В.Я. МАТЮШЕНКО

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Пособие для самостоятельной работы студентов
инженерно-технических специальностей втузов
безотрывной формы обучения

Одобрено советом строительного факультета

Гомель 1998

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА

Кафедра физики

А.С. СТРОГИЙ, М.В. БУЙ, В.Я. МАТЮШЕНКО

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Пособие для самостоятельной работы студентов
инженерно-технических специальностей втузов
безотрывной формы обучения

Гомель 1998

УДК 537 + 537.6/.8 (075.8)

Строгий А. С., Буй М. В., Матюшенко В. Я.
С 861 ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ: Пособие для самостоятельной работы студентов инженерно-технических специальностей втузов безотрывной формы обучения. - Гомель: БелГУТ, 1998. - 100 с.

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. Магнетизм”, программы курса физики для инженерно-технических специальностей втузов.

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

Библиогр. 20 назв. Ил. 36.

Р е ц е н з е н т ы - кафедра общей физики Гомельского политехнического института им. П.О. Сухого;
канд. физ.-мат. наук, доцент В.Ф. Шолох (ГГУ им. Ф.Скорины)

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Курс физики втузов делится на шесть разделов. В соответствии с этим учебный материал пособия распределен на три части, которые включают в себя по два раздела курса. Изучение каждого раздела сопровождается выполнением одной контрольной работы из восьми задач. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем в конце соответствующей экзаменационной сессии.

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

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА ПО УЧЕБНЫМ ПОСОБИЯМ

Самостоятельная работа по учебным 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 учебное 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 учебным пособиям.

3. Работа над учебными пособиями 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 пособии при изучении каждого раздела.

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, вспомнить словесную формулировку этих законов, 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, поясняющий содержание задачи. Выполнить его нужно аккуратно при помощи чертежных принадлежностей.

3. Решение задачи должно сопровождаться краткими исчерпывающими пояснениями.

4. Все величины, входящие в условие задачи, необходимо выразить в единицах СИ. Проверить размерность искомой величины. Для этого подставить в правую часть полученной 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.

5. В окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, подставить числовые значения, выраженные в единицах одной системы (СИ). Пренебрежение этим правилом приводит к неверному результату.

6. Произвести вычисления величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений. При необходимости представлять результат в виде степенной

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

7. Оценить правдоподобность полученного результата.

Физические задачи весьма разнообразны, и дать единый рецепт их решения невозможно. Однако, как правило, физические задачи следует решать в общем виде, т. е. в буквенных выражениях, не производя вычисления промежуточных величин; числовые значения подставляются только в окончательную рабочую формулу, выражающую искомую величину. Умение решать задачи приобретается длительными и систематическими упражнениями.

ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Выполнение контрольных работ студентом и их рецензирование преследует две цели: во-первых, таким путем можно осуществлять контроль за самостоятельной работой студента, во-вторых, при необходимости оказать ему помощь по вопросам, которые оказались слабо усвоенными или непонятыми студентом.

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 данном 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 обычной 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 шариковой ручкой. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Для замечаний рецензента на страницах тетради оставляют поля. Условия задач переписываются полностью, без сокращений.

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

5. 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.

6. Получив прорецензированную работу, студент обязан устранить недостатки, указанные рецензентом.

7. Если после рецензирования контрольная работа не зачтена, студент обязан послать ее на повторное рецензирование, включив в нее те задачи, в которых были допущены ошибки. Исправленные задачи представляются вместе с незачтенной работой. Допускаются исправления в той же тетради в конце контрольной работы.

8. Студент является на экзаменационную сессию, получает прорецензированные работы и по расписанию деканата защищает их перед преподавателем. Зачтенные контрольные работы предъявляются экзаменатору.Студент должен быть готов при защите контрольной работы дать пояснения по существу решения входящих в нее задач.

1. 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 форме. Сопротивление проводника. Соединение проводников. Электродвижущая сила. Напряжение. Законы Кирхгофа для разветвленных цепей. Работа и мощность тока. Закон Джоуля–Ленца. Объяснение законов Ома и Джоуля–Ленца на основе элементарной классической теории электропроводности металлов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ. Механизм ионизации и рекомбинации. Ударная ионизация. Потенциал ионизации. 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.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ. Магнитное взаимодействие. Магнитное поле. Магнитная индукция. Силовые линии магнитного поля. Закон Био–Савара–Лапласа.

Магнитное поле прямолинейного и кругового токов. Закон Ампера. Сила взаимодействия параллельных токов. Магнитный момент контура с током. Магнитное поле движущихся зарядов.

Циркуляция вектора магнитной индукции. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Магнитное поле соленоида и тороида.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ. Сила Лоренца. Эффект Холла. Ускорение заряженных частиц. Масс–спектрометры.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ. Понятие об элементарных токах в веществе. Элементарный ток во внешнем магнитном поле. Намагниченность. Магнитная восприимчивость и магнитная проницаемость. Напряженность магнитного поля. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетики и их свойства. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Природа ферромагнетизма.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ. Поток вектора магнитной индукции. Потокосцепление. Работа по перемещению проводника с током и контура с током в магнитном поле. Опыты Фарадея. ЭДС электромагнитной индукции. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца. Токи при размыкании и замыкании цепи. Индуктивность контура. Явление самоиндукции. Взаимная индукция. Трансформатор.

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. Энергия магнитного поля соленоида. Плотность энергии магнитного поля.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ МАКСВЕЛЛА. Обобщение закона электромагнитной индукции. Ток смещения. Уравнения Максвелла для произвольных полей.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: Наука, 1989. – 496 с.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1989. – 608 с.
3. Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: Высшая школа, 1990. – 478 с.
4. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. – М.: Высшая школа, 1991. – 303 с.
5. Чертов А.Г., Воробьёв А.А. Задачник по физике. – М.: Высшая школа, 1988. – 526 с.

Дополнительная

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

6. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Высшая школа, 1964. – 668 с.

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

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

11. Савельев И.В. Сборник задач и вопросов по общей физике. - М.: Наука, 1988. – 288 с.

12. Чертов А.Г. Физические величины. – М.: Высшая школа, 1990. – 315 с.

13. Сена Л.И. Единицы физических величин и их размерности. - М.: Наука, 1988. – 432 с.

14. Физика: Задания к практическим занятиям /Под ред. Ж.П. Лагутиной. – Минск: Вышэйшая школа, 1989. – 236 с.

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

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

17. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.

18. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 520 с.

19. Зильберман Г.Е. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1970. – 384 с.

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

2. ЭЛЕКТРОСТАТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

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 взаимодействия точечных зарядов q_1 и q_2; r - расстояние между зарядами; $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - электрическая постоянная; ε - диэлектрическая проницаемость среды.

Закон сохранения электрического заряда

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

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

Напряжённость электрического поля

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

где 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 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 заряды q_1, q_2, ... q_n,

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

где $\sum_{i=1}^{n} q_i$ - алгебраическая сумма зарядов, заключённых внутри 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 ($r < R$)

$$\mathbf{E = 0};$$

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 заряда есть величина, равная отношению заряда, распределённого по нити, к длине нити (цилиндра),

$$\tau = \frac{dq}{dl}.$$

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

$$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0 \varepsilon} \frac{\tau}{r}.$$

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:

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

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 этому заряду

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

Потенциал электрического поля в бесконечности 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 потециалов, 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

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

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

$$A = q\left(\varphi_1 - \varphi_2\right), \text{ или } A = q\int_{1}^{2} E_l\,dl ,$$

где E_l - проекция вектора напряжённости на направление перемещения; dl - перемещение.

В случае однородного поля формула для работы принимает вид

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

где l - перемещение; 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 $\vec{l}$, проведённый от отрицательного заряда диполя к его положительному заряду, называется плечом диполя.

Электрический момент диполя

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

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

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.

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.

Связь диэлектрической проницаемости с диэлектрической восприимчивостью

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

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

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} \qquad \text{и} \qquad E = E_0 - \frac{P}{\varepsilon_0}.$$

Электрическое смещение связано с напряжённостью поля соотношением

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

<u>Теорема Остроградского-Гаусса для электростатического поля в веществе</u>. 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 одной пластины; d - расстояние между пластинами.

Электрическая ёмкость цилиндрического конденсатора

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

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:

в общем случае $$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}$$

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

Емкость батареи конденсаторов при параллельном соединении

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

Энергия заряженного конденсатора

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

Энергия электростатического поля плоского конденсатора

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

где S - площадь одной пластины; U - разность потенциалов между пластинами; V - 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; <v> - средняя скорость упорядоченного движения зарядов в проводнике.

Закон Ома

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

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

для неоднородного участка цепи

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

для замкнутой цепи

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

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

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

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

Зависимость удельного сопротивления от температуры

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

где ρ и ρ_0 - удельные сопротивления, соответственно, при t и 0^0 С; t - температура (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 Ri - сопротивление i-го проводника, n - число проводников.

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 I_i - сила тока на i-м участке; R_i - сопротивление i-го участка;

ε_i - ЭДС источников тока на i-м участке; n - число участков, содержащих активное сопротивление; k - число участков, содержащих источники тока.

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

$$A = IUt.$$

Мощность тока

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

Закон Джоуля-Ленца

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

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

Закон Джоуля-Ленца в дифференциальной форме

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

где w - удельная тепловая мощность тока.

Закон Видемана-Франца

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

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

Плотность тока в газе при отсутствии насыщения

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

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

Плотность тока насыщения в газе между плоскими электродами

$$j_H = q\Delta nd,$$

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

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

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

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

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ №3

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

Р е ш е н и е . Все три заряда находятся в одинаковых условиях. Поэтому достаточно выяснить, при каких условиях будет находиться в равновесии один из трёх зарядов, например q_1 (рис.1).

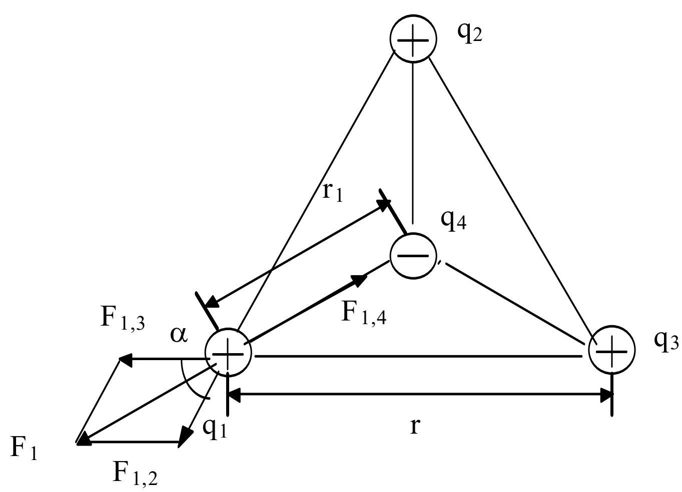

Рис. 1

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

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

или $F_1 - F_{1,4} = 0$. Выразив F_1 через $F_{1,2}$ и $F_{1,3}$ и учитывая, что $F_{1,2} = F_{1,3}$, получим

$$F_{1,4} = F_{1,2}\sqrt{2(1+\cos\alpha)}.$$

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

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

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

Из геометрических построений в равностороннем треугольнике

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

С учётом этого $q_4 = q_1/1{,}73 = 0{,}58$ нКл.

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

Р е ш е н и е . 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 (рис. 2). Заряд этого элемента

$$dq = \tau\, dx.$$

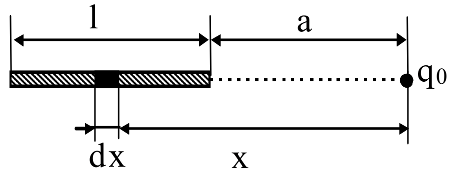

Рис. 2

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

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

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:

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

Вынеся постоянные множители за знак интеграла, получим

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

Выразим в единицах СИ входящие в формулу величины: l = 0,15 м, а = 0,1 м, $q_0 = 1\cdot10^{-8}$ Кл, $\tau = 1\cdot10^{-7}$ Кл/м. Подставляя эти значения и выполнив вычисления, найдём $F = 5\cdot10^{-5}$ Н.

Пример 3. *Найти напряжённость и потенциал в центре полукольца радиусом 5 см, по которому равномерно распределён заряд $q = 3\cdot10^{-9}$ Кл.*

Р е ш е н и е . Физическую систему составляют: равномерно заряженное зарядом q полукольцо и электрическое поле этого заряда. Для определения напряжённости E и потенциала φ в центре полукольца воспользуемся принципом суперпозиции. Разделим полукольцо на малые элементы дуги dl так, чтобы заряд $dq = \tau dl = q dl/(\pi R)$ каждого такого элемента дуги можно было считать точечным. Выберем два произвольных симметрично расположенных относительно OO' элемента дуги (рис.3). Напряжённость электрического поля в точке О, создаваемого выбранными элементами, согласно принципу суперпозиции,

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

Из соображений симметрии следует, что алгебраическая сумма проекций напряжённостей полей выбранных элементов на ось Oy равна нулю. Результирующее поле направлено вдоль оси Ox:

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

Так как $dl = Rd\alpha$, то $dE = \dfrac{q\cos\alpha}{4\pi^2\varepsilon_0 R^2}\,d\alpha.$

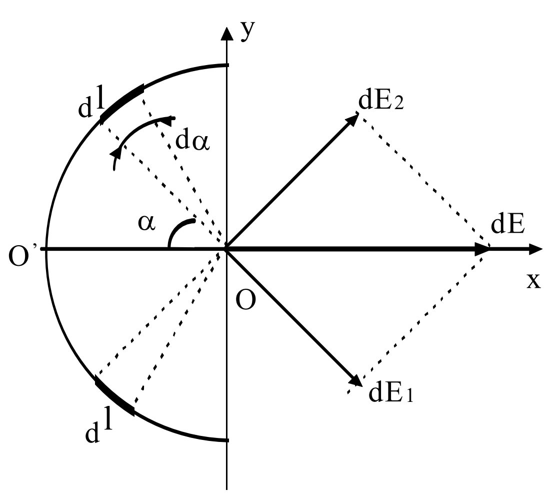

Рис. 3

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

$$E = E_x = \frac{q}{4\pi^2\varepsilon_0 R^2}\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}}\cos\alpha d\alpha = \frac{q}{2\pi^2\varepsilon_0 R^2}.$$

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

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

Подставив численные значения величин, получим $E = 6{,}88\cdot 10^3$ В/м, $\varphi = 539$ В.

Пример 4. *Определить начальную скорость v_0 сближения протонов, находящихся на очень большом расстоянии друг от друга, если минимальное расстояние r_{min}, на которое они могут сблизиться, равно 10^{-11} см.*

Р е ш е н и е. Поместим начало координат в центр масс двух протонов. Он будет находиться посередине отрезка, соединяющего эти две одинаковые частицы. Относительно центра масс протоны будут всегда иметь одинаковые по модулю скорости. Когда частицы находятся на достаточно большом расстоянии друг от друга, скорости v_1 каждой частицы равны половине v_0, т.е. $v_1 = v_0/2$.

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

$$E = T + \Pi,$$

где T - сумма кинетических энергий обоих протонов относительно центра масс; Π - потенциальная энергия системы зарядов.

В начальный момент протоны находились на большом расстоянии, поэтому их потенциальной энергией можно пренебречь ($\Pi_1 = 0$). Полная энергия будет равна кинетической энергии протонов:

$$E = T_1. \qquad (1)$$

В конечный момент, когда протоны максимально сблизятся, скорость и кинетическая энергия равны нулю, а полная энергия будет равна потенциальной энергии протонов

$$E = \Pi_2. \qquad (2)$$

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

$$T_1 = П_2. \qquad (3)$$

Кинетическая энергия равна сумме кинетических энергий протонов:

$$T_1 = \frac{mv_1^2}{2} + \frac{mv_2^2}{2} = mv_1^2 = \frac{mv_0^2}{4}. \qquad (4)$$

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

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

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

$$\frac{mv_0^2}{4} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r_{min}}, \quad \text{откуда} \quad v_0 = \frac{e}{\sqrt{\pi\varepsilon_0 m r_{min}}}.$$

Выполнив вычисления по полученной формуле, найдем v_0 = 2,35 Мм/с.

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 5. *Конденсатор емкостью C_1 = 3 мкФ заряжен до напряжения U_1 = 300 В, а конденсатор емкостью C_2 = 2 мкФ - до U_2 = 200 В. Определить напряжение между пластинами конденсатора после соединения их:*

а) одноименно заряженными пластинами; б) разноименно заряженными пластинами. Какое количество теплоты выделится в результате соединения конденсаторов в случае “а“?

Р е ш е н и е. Если конденсаторы соединены параллельно, то их общая емкость $C = C_1 + C_2$. Так как соединялись одноименно заряженные пластины, то искомое напряжение

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

где q_1 и q_2 - заряды конденсаторов до соединения. Учитывая, что
$q_1 = C_1 U_1$ и $q_2 = C_2 U_2$, получим

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

Если конденсаторы соединены разноименно заряженными пластинами, то напряжение между ними

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

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

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

После соединения

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

Следовательно, искомое количество теплоты

$$Q = E_1 - E_2 = 6 \text{ мДж}.$$

Пример 6. *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.*

Р е ш е н и е . Векторы электрического смещения и напряжённости соответственно, 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 = σ' , т.е. поляризованность равна поверхностной плотности связанных зарядов диэлектрика. Тогда

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

Учитывая, что D = $\varepsilon_0\varepsilon E$ и E = U/d, где d - расстояние между обкладками конденсатора, найдём

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

Вычисляя, получим σ' = 2,65 мкКл/м^2.

Пример 7. *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 . Согласно законам Джоуля-Ленца и Ома в дифференциальной форме

$$w = \gamma E^2 = E^2/\rho, \qquad (1)$$

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

где γ и ρ - соответственно удельные проводимость и сопротивление материала проводника. Из закона (2) получим, что $E = \rho j$. Подставив это выражение в (1), найдем искомую плотность тока:

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

Пример 8. *Сила тока в проводнике сопротивлением R = 50 Ом равномерно растет от I_0 = 0 до I_{max} =3 А за время τ = 6 с. Определить выделившееся за это время количество теплоты.*

Р е ш е н и е. Согласно закону Джоуля-Ленца для бесконечно малого промежутка времени

$$dQ = I^2 R\,dt.$$

По условию задачи сила тока равномерно растет, т.е. I = kt, где коэффициент пропорциональности k = (I_{max} - I_0)/τ = const. Тогда можно записать

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

Проинтегрировав (1) и подставив выражение для k, найдем искомое количество теплоты

$$Q=\int_0^{\tau} k^2 R t^2 dt=\frac{1}{3}k^2 R\tau^3=\frac{1}{3}\frac{\left(I_{max}-I_0\right)^2}{\tau^2}R\tau^3=\frac{1}{3}R\tau\left(I_{max}-I_0\right)^2.$$

Вычисляя, получим Q = 900 Дж.

Пример 9. *Батарея из двух элементов с ЭДС $\mathcal{E}_1$ = 8 В, $\mathcal{E}_2$ = 4 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 1 Ом, r_2 = 0,5 Ом и сопротивление*
R = 50 Ом соединены, как показано на рис. 4. Определить силу тока в резисторе.

Р е ш е н и е. Выберем направление обхода контуров по часовой стрелке и применим правила Кирхгофа для каждого из контуров.

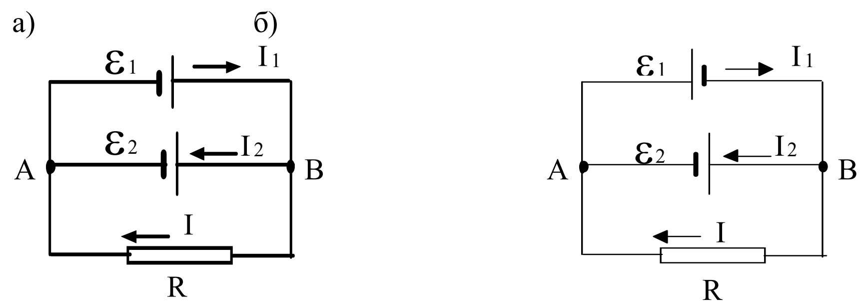

Рис. 4.

Если источники соединены так, как показано на рис. 4а, то для узла А по первому закону Кирхгофа

$$I_2 + I = I_1.$$

Для контуров $\mathcal{E}_1$BRA$\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$BRA$\mathcal{E}_2$ по второму закону Кирхгофа

$$I_1 r_1 + IR = \mathcal{E}_1 \quad \text{и} \quad -I_2 r_2 + IR = \mathcal{E}_2.$$

Подставив значения для I_1 и I_2, получим

$$\frac{-\mathcal{E}_2 + IR}{r_2} + I = \frac{\mathcal{E}_1 - IR}{r_1}$$

или $$-\mathcal{E}_2 r_1 + IRr_1 + Ir_1 r_2 = \mathcal{E}_1 r_2 - IRr_2,$$

откуда $$I = \frac{\mathcal{E}_2 r_1 + \mathcal{E}_1 r_2}{Rr_1 + r_1 r_2 + Rr_2} = 1\ \text{А}.$$

Если выбрать направление тока, противоположное тому, которое указано на рис. 4а, то согласно законам Кирхгофа для узлов и контуров будем иметь

$$I_2 + I = I_1; \quad -I_2 r_2 - IR = \mathcal{E}_2;$$

$$-\mathcal{E}_2 r_1 - IRr_1 - Ir_1 r_2 = \mathcal{E}_1 r_2 + IRr_2;$$

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

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

Если источники соединены так, как показано на рис. 4б, то

для узла А $\quad I_2 + I = I_1,$

для контура $\varepsilon_1 BRA \varepsilon_1$ $\quad I_1 r_1 - IR = \varepsilon_1,$

для контура $\varepsilon_2 BRA \varepsilon_2$ $\quad -I_2 r_2 + IR = -\varepsilon_2.$

Совместное решение уравнений дает

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

Пример 10. *Дуговая лампа горит под напряжением U = 50 В и потребляет мощность P = 500 Вт. Определить на сколько градусов нагреются подводящие провода через τ = 1 мин после включения лампы, если проводка выполнена медным проводом сечением S = 1 мм* ^{2} *и половина выделившейся теплоты отдана окружающим телам; число электронов, проходящих через поперечное сечение провода за 1 с; среднюю скорость упорядоченного движения электронов, считая число электронов в проводнике равным числу атомов; силу, действующую на отдельные электроны проводимости.*

Р е ш е н и е. Количество теплоты, выделившейся в проводах за время τ $Q = I^2 R\tau$, и количество теплоты, пошедшей на нагревание проводника $Q = cm\Delta t$, связаны соотношением

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

где c - удельная теплоемкость; $m = \rho_M S l$ - масса провода; ρ_M - плотность меди; η - КПД. Так как $I = P/U$ и $R = \rho l/S$ то из формулы(1) получим

$$\Delta t = \frac{\eta P^2 \rho\tau}{c\rho_M S^2 U^2} \approx 3{,}8^0\,C.$$

Число электронов, проходящих через поперечное сечение за 1 с,

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

Среднюю скорость упорядоченного движения электронов из выражения для плотности тока

$$\langle v \rangle = \frac{I}{en_0 S} = \frac{P}{SUen_0},$$

где $n_0 = \frac{N_A}{V_0} = \frac{N_A \rho_M}{A}$ - число свободных электронов в единице объема, A - атомная масса меди. Следовательно,

$$\langle v \rangle = \frac{PA}{eN_A \rho_M SU} = 3{,}74 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Сила, действующая на отдельные электроны проводимости,

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

Пример 11. *Пространство между пластинами плоского конденсатора имеет объем V = 375 см^3 и заполнено частично ионизированным водородом. Площадь пластин конденсатора S = 250 см ^{2}. При каком напряжении U между пластинами конденсатора сила тока I, протекающего через конденсатор, достигнет значения 2 мкА, если концентрация ионов обоих знаков в газе равна $5{,}3 \cdot 10^7$ см$^{-3}$? Принять подвижность ионов $u_+ = 5{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^2/(В·с), $u_- = 7{,}4 \cdot 10^{-4}$ м^2/(В·с).*

Р е ш е н и е. Напряжение на пластинах конденсатора связано с напряженностью электрического поля между пластинами и расстоянием между ними соотношением

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

Напряженность поля может быть найдена из выражения плотности тока

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

где q - заряд иона. Отсюда

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

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

Подставив выражения E и d в (1), получим

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

Подставив в формулу (2) значения величин и произведя вычисления, получим: U = 110 В.

Задания к контрольным работам

Контрольная работа №3

3.1. Вычислить ускорение, сообщаемое одним электроном другому, находящемуся от первого на расстоянии 1 мм.

3.2. Два 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 14 см. Диаметры шариков существенно меньше расстояния между ними.

3.3. Два одинаковых иона на расстоянии 10^{-8} м в вакууме взаимодействуют с силой $9{,}2 \cdot 10^{-12}$ Н. Сколько ”лишних” электронов у каждого иона?

3.4. 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. Что произойдет после того, как один из шариков разрядить?

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

3.6. 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.

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

3.8. Тонкий стержень длиной 10 см равномерно заряжен. Линейная плотность заряда 17 мкКл/м. На продолжении стержня на расстоянии 20 см от ближайшего конца расположен точечный заряд 78 нКл. Найти силу взаимодействия заряженного стержня и точечного заряда.

3.9. 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 заряженного стержня и точечного заряда.

3.10. 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.

3.11. Тонкий стержень длиной 10 см несет равномерно распределенный заряд с линейной плотностью 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.

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

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

3.14. В вершинах квадрата помещены точечные положительные заряды по 1 мкКл каждый. Какой заряд надо поместить в центре квадрата, чтобы вся система находилась в равновесии?

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

3.16. 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 60^0.

3.17. 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 60^0.

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

3.19. 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?

3.20. 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?

3.21. На тонкой 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.

3.22. 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 сообщили ему заряд. После соприкосновения с другим шариком они разошлись так, что нити образовали угол 60^0. Определить величину заряда, сообщенного первому шарику.

3.23. Два одинаковых шарика подвешены на нитях одинаковой длины. При сообщении им заряда они разошлись на угол 80^0. Через некоторое время шарики сблизились до угла 60^0. Какая доля первоначального заряда осталась на каждом из шариков?

3.24. 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?

3.25. Два точечных заряда величиной 1,1 нКл находятся на расстоянии 17 см. С какой силой и в каком направлении они действуют на такой же заряд, находящийся на расстоянии 17 см от каждого из них?

3.26. В точке А напряженность поля точечного заряда равна
36 В/м, а точке В – 9 В/м. Определить напряженность поля в точке С, лежащей посередине между точками А и В.

3.27. 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.

3.28. 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 60^0.

3.29. Расстояние между зарядами - 1 нКл и 10 нКл равно 0,55 м. Определить напряженность поля в точке на прямой, проходящей через заряды, в которой потенциал равен нулю.

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

3.31. 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 поверхности сферы; с) на расстоянии 36 см от центра сферы. Построить графики $E = E(r)$ и $\varphi = \varphi(r)$.

3.32. 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 с поверхностную плотность заряда.

3.33. В вершинах правильного треугольника со стороной 0,3 м расположены заряды 50 нКл, 20 нКл, 10 нКл. Определить потенциальную энергию системы.

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

3.35. 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.

3.36. В керосине на расстоянии 5 см друг от друга находятся два заряда 20 и 30 нКл. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в точке, лежащей на перпендикуляре, восстановленном к середине прямой, соединяющей оба заряда, на расстоянии, равном половине расстояния между указанными зарядами.

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

3.38. Какую работу требуется совершить для того, чтобы два равных заряда 3 мкКл, находящиеся на расстоянии 60 см друг от друга, сблизить до расстояния 20 см?

3.39. Точечные заряды q_1 = -17 нКл и q_2 = 20 нКл находятся от точечного заряда q_0 = 30 нКл на расстояниях d_1 = 2 см и d_2 = 5 см. Какую работу требуется совершить, чтобы два первых заряда поменять местами?

3.40. 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?.

3.41. В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые заряды 2 нКл. Определить напряженность и потенциал электростатического поля: а) в центре квадрата; б) в середине одной из сторон квадрата.

3.42. 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.

3.43. 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).

3.44. 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).

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

3.46. Кольцо радиусом 5 см из тонкой проволоки несет равномерно распределенный заряд 10 нКл. Определить потенциал электростатического поля: 1) в центре кольца; 2) на оси, проходящей через центр кольца, в точке, удаленной на расстояние 10 см от центра кольца.

3.47. 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.

3.48. 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.

3.49. 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.

5.50. 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.

5.51. 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.

5.52. 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.

5.53. Металлический шарик диаметром d = 2 см заряжен отрицательно до потенциала φ = 150 В. Сколько избыточных электронов N находится на поверхности шарика?

5.54. 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.

5.55. Капелька воды диаметром 0,1 мм несет такой отрицательный заряд, что напряженность электрического поля на ее поверхности $E_0 = 6 \cdot 10^5$ В/м. Найти напряженность E вертикального поля, удерживающего каплю от падения.

5.56. 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.

5.57. 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 τ = 30 мкКл/м.

5.58. Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ = 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.

5.59. 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 $\varphi = 30^0$. Поверхностная плотность заряда равна σ = 1 мкКл/м^2. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через эту пластину.

5.60. В центре сферы радиусом R = 20 см находится точечный заряд q = 10 нКл. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через часть сферической поверхности площадью S = 20 см^2.

5.61. Прямоугольная плоская площадка со сторонами, длины которых равны a = 3 см и b = 2 см, находится на расстоянии R = 1 м от точечного заряда q = 1 мкКл. Площадка ориентирована так, что ее плоскость составляет угол $\varphi = 30^0$ с линиями поля. Вычислить поток вектора напряженности Φ_E через площадку.

5.62. Бесконечная плоскость несет заряд, равномерно распределенный с поверхностной плотностью σ = 20 нКл/м^2. Параллельно ей расположена прямая тонкая нить, заряженная равномерно с линейной плотностью заряда τ = 0,4 нКл/м. Определить силу, действующую на отрезок нити длиной 1 м.

5.63. Бесконечная прямая нить заряжена равномерно с линейной плотностью заряда τ_1 = 1 мкКл/м. Соосно с нитью расположено тонкое кольцо, заряженное равномерно с линейной плотностью заряда τ_2 = 10 нКл/м. Определить силу F, растягивающую кольцо. Взаимодействием между отдельными элементами кольца пренебречь.

5.64. Тонкие стержни образуют квадрат со стороной a. Стержни заряжены с линейной плотностью τ = 1,33 нКл/м. Найти потенциал φ в центре квадрата.

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

5.66. 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.

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

5.68. Электрон с начальной скоростью v_0 = 3 Мм/с влетел в однородное электрическое поле напряженностью E = 150 В/м перпендикулярно линиям напряженности. Найти: 1) силу F, действующую на электрон; 2) ускорение a, приобретаемое электроном; 3) скорость электрона v через время t = 0,1 мкс.

5.69. Электрон влетел в пространство между пластинами плоского конденсатора параллельно пластинам с начальной скоростью
v_0 = 10 Мм/с. На сколько 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?

5.70. 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 α = 35^0 с первоначальным направлением скорости. Определить разность потенциалов между пластинами, если длина пластин равна 10 см, а расстояние между ними 2 см.

5.71. Бесконечная равномерно заряженная плоскость имеет поверхностную плотность зарядов σ = 9 мкКл/м^2. Над ней находится алюминиевый шарик с зарядом q = 36,8 мкКл. Какой радиус должен иметь шарик, чтобы он не падал?

5.72. Узкий пучок электронов, обладающих энергией 1600 эВ, проходит в вакууме посередине между пластинами плоского конденсатора параллельно пластинам. Какое минимальное напряжение необходимо приложить к пластинам, чтобы электроны не вышли за пределы пластин? Длина пластин равна 2 см, а расстояние между ними равно 1 см.

5.73. В вершинах треугольника со сторонами AB = 0,3 м, BC = 0,5 м и AC = 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. Заряды находятся в керосине.

5.74. Две бесконечные параллельные плоскости несут равномерно распределенные по поверхностям заряды с плотностями
σ_1 = 10 мкКл/м^2 и σ_2 = – 30 мкКл/м^2. Определить силу взаимодействия между пластинами, приходящуюся на площадь S = 1 м^2.

5.75. Определить потенциал φ, до которого можно зарядить уединенный металлический шар радиусом R = 10 см, если напряженность поля, при которой происходит пробой воздуха, равна

E = 3 МВ/м. Найти также максимальную поверхностную плотность σ электрических зарядов перед пробоем.

3.76. В однородное электростатическое поле напряженностью E_0 = 700 В/м перпендикулярно полю помещается бесконечная плоскопараллельная стеклянная пластинка. Определить: 1) напряженность поля внутри пластины; 2) электрическое смещение внутри пластины; 3) поляризованность стекла; 4) поверхностную плотность связанных зарядов на стекле.

3.77. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено парафином. Расстояние между пластинами 8,85 мм. Какую разность потенциалов нужно подать на пластины, чтобы поверхностная плотность связанных зарядов на парафине составляла 0,1 нКл/см^2?

3.78. Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет 5 мм. После зарядки конденсатора до разности потенциалов 500 В между пластинами конденсатора вдвинули стеклянную пластинку. Определить: 1) диэлектрическую восприимчивость стекла; 2) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стеклянной пластинке.

3.79. Определить поверхностную плотность связанных зарядов на слюдяной пластинке толщиной 1 мм, служащей изолятором плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами конденсатора 300 В.

3.80. 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) напряженности электростатических полей в слоях диэлектрика; 2) электрическое смещение.

3.81. Расстояние между пластинами плоского конденсатора составляет 1 см, разность потенциалов – 200 В. Определить поверхностную плотность σ' связанных зарядов эбонитовой пластинки толщиной 8 мм, помещенной на нижнюю пластину конденсатора.

3.82. Пространство между пластинами плоского конденсатора заполнено стеклом. Расстояние между пластинами 5 мм. Разность потенциалов равна 1 кВ. Определить: 1) напряженность электростатического поля в стекле; 2) поверхностную плотность зарядов на пластинах конденсатора; 3) поверхностную плотность связанных зарядов σ' на стекле.

3.83. 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.

3.84. Найти силу взаимодействия двух молекул воды, электрические моменты которых расположены вдоль одной прямой. Молекулы находятся друг от друга на расстоянии $2{,}5\cdot10^{-7}$ см. Электрический момент молекулы воды $p = 6{,}2\cdot10^{-30}$ Кл·м.

3.85. Диполь, электрический момент которого $p = 3\cdot10^{-10}$ Кл·м, свободно устанавливается в однородном электрическом поле напряженностью E = 1500 В/см. Какую работу нужно совершить, чтобы повернуть диполь на угол $\alpha = 180^0$?

3.86. 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 на пластинке фарфора.

3.87. 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'.

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

3.89. Поверхностная плотность связанных зарядов на поверхности слюдяной пластинки толщиной 0,2 мм, служащей изолятором в плоском конденсаторе, $\sigma' = 2{,}88\cdot10^{-5}$ Кл/м^2. Найти разность потенциалов между обкладками конденсатора.

3.90. 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'.

3.91. Металлический шар радиусом $R_1 = 2$ см с зарядом $q = 8{,}1\cdot10^{-9}$ Кл окружен вплотную прилегающим слоем диэлектрика
(ε = 3) с внешним радиусом $R_2 = 5$ см. Найти поверхностную плотность связанных зарядов σ'_1 и σ'_2 на обеих сторонах диэлектрика.

3.92. Металлический 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, примыкающей 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.

3.93. 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?

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

3.95. При какой поляризованности P диэлектрика (ε = 5) напряженность среднего макроскопического поля в диэлектрике равна
10 МВ/м?

3.96. При какой напряженности среднего макроскопического поля в диэлектрике (ε = 3) поляризованность P диэлектрика достигнет значения, равного 200 мкКл/м^2?

3.97. 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.

3.98. 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.

3.99. Молекула HF обладает дипольным электрическим моментом $p = 6{,}4\cdot10^{-30}$ Кл·м. Межъядерное расстояние d = 92 пм. Найти заряд q такого диполя и объяснить, почему найденное значение заряда отличается от значения элементарного заряда e.

3.100. Расстояние d между пластинами плоского конденсатора равно 2 мм, разность потенциалов U = 1,8 кВ. Диэлектрик – стекло. Определить диэлектрическую восприимчивость стекла и поверхностную плотность поляризационных (связанных) зарядов на поверхности стекла.

3.101. 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.

3.102. 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_2 до и после внесения диэлектрика.

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

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

3.105. Определить емкость C батареи конденсаторов, изображенной на рис.5. Емкость каждого конденсатора C_i = 1 мкФ.

3.106. Шар, погружённый в масло, имеет поверхностную плотность заряда σ = 1 мкКл/$м^2$ и потенциал φ = 500 В. Определить:
1) радиус шара; 2) заряд шара; 3) емкость шара; 4) энергию шара.

3.107. 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.

3.108. 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: 1) отключался; 2) не отключался.

3.109. 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.

3.110. Тысяча водяных капель одинакового радиуса и одинаково заряженных сливаются в одну большую каплю. Во сколько раз потенциал, емкость и энергия большой капли превышают соответствующие величины одной малой капли? Поверхностное натяжение не учитывать.

3.111. 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.

3.112. 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.

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

3.114. 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: 1) подключен к источнику тока; 2) отключен от источника тока.

3.115. В схеме, приведенной на рис.6, известно, что емкости конденсаторов $C_1 = C_5 = 6$ мкФ, $C_2 = 1{,}5$ мкФ, $C_3 = C_4 = 3$ мкФ и
$U = 100$ В. Определить емкость батареи, заряд и напряжение на каждом конденсаторе.

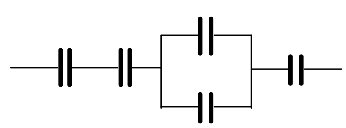

Рис.5

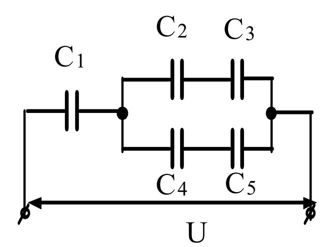

Рис.6

3.116. 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.

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

3.118. 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?

3.119. 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.

3.120. 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.

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

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

3.123. Конденсаторы емкостями C_1 = 1 мкФ, C_2 = 2 мкФ,
C_3 = 3 мкФ включены в цепь с напряжением U = 1,1 кВ. Определить энергию каждого конденсатора в случаях: 1) последовательного их включения; 2) параллельного включения.

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

3.125. Найти энергию W электростатического поля металлического шара, которому сообщен заряд q = 100 нКл, если диаметр шара d = 20 см.

3.126. 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?

3.127. Электрон, пройдя в плоском конденсаторе путь от одной пластины к другой, приобретает скорость v = 10^6 м/с. Расстояние между пластинами d = 5,3 мм. Найти: а) разность потенциалов U между пластинами; б) напряженность электрического поля E внутри конденсатора; в) объемную плотность энергии поля w в конденсаторе.

3.128. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора U = 200 В, расстояние между пластинами d = 1 см. В пространство между пластинами помещается плоскопараллельная пластинка парафина толщиной d_1 = 0,5 см. Найти в каждом слое:
а) напряженность электрического поля E_1 и E_2; б) падение потенциала U_1 и U_2; г) объемную плотность энергии w_1 и w_2.

3.129. Найти объемную плотность энергии w электрического поля в точке, находящейся на расстоянии d = 2 см от поверхности заряженного шара радиусом R = 1 см, если поверхностная плотность заряда на шаре σ = $1{,}7\cdot10^{-5}$ Кл/$м^2$.

3.130. Плоский конденсатор имеет в качестве изолирующего слоя стеклянную пластинку, толщина которой d = 2 мм и площадь
S = 300 $см^2$. Конденсатор заряжается до разности потенциалов
U = 300 В, после чего отключается от источника напряжения. Определить механическую работу A, которую необходимо совершить, чтобы вынуть пластинку из конденсатора. Трение в расчет не принимать.

3.131. 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.

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

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

3.134. В цепи (рис.7) $R_1 = R_4 = 30$ 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.

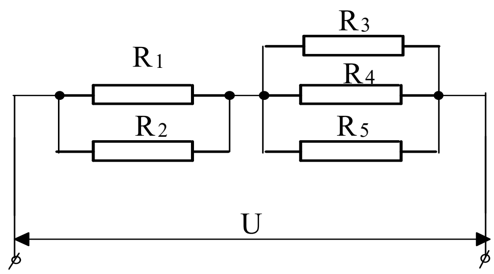

Рис.7

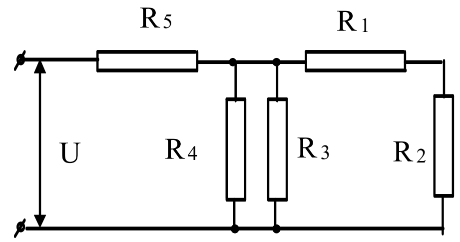

Рис.8

3.135. В цепи (рис.8) $R_1 = 10$ 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.

3.136. В цепи (рис.9) $R_1 = 2$ Ом, $R_2 = 3$ Ом, $R_3 = 6$ Ом, $R_4 = 7$ Ом и $U = 36$ В. Определить силу тока на участке CD, если $R_{CD} = 0$.

3.137. В цепи (рис.9) $R_1 = 1$ 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.

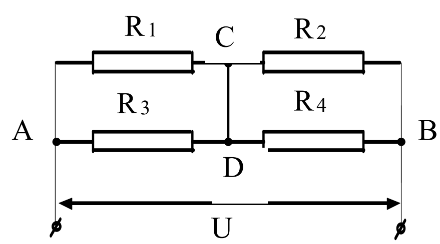

Рис.9

3.138. 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?

3.139. Источник тока с ЭДС 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.

3.140. 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.

3.141. По медному проводнику сечением 0,8 мм^2 течет ток 80 мА. Найти среднюю скорость упорядоченного движения электронов вдоль проводника, предполагая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон.

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

3.143. 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 ^{0}С?

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

3.145. На рис.10 $R_1 = R_2$ = 50 Ом, R_3 = 100 Ом, С = 50 нФ. Определить ЭДС источника, пренебрегая его внутренним сопротивлением, если заряд на конденсаторе q = 2,2 мкКл.

3.146. Два источника тока с ЭДС ε_1 = 2 В и ε_2 = 1,5 В и внутренними сопротивлениями r_1 = 0,5 Ом и r_2 = 0,4 Ом включены параллельно сопротивлению R = 2 Ом (рис.11). Определить силу тока через это сопротивление.

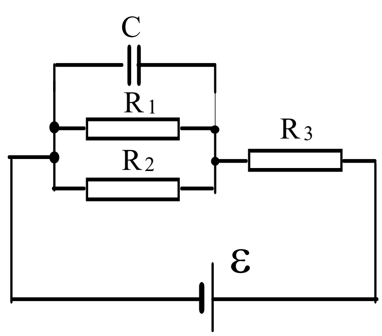

Рис.10

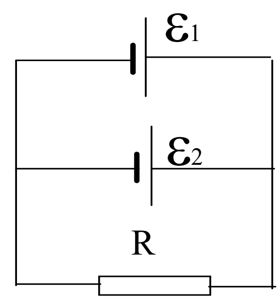

Рис.11

3.147. На рис.12 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$, 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.

3.148. На рис.13 ε = 2В, 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.

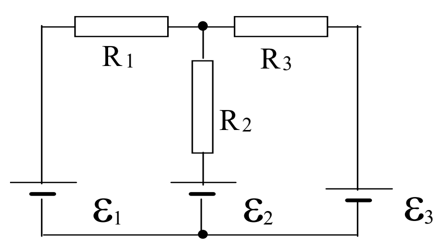

Рис.12

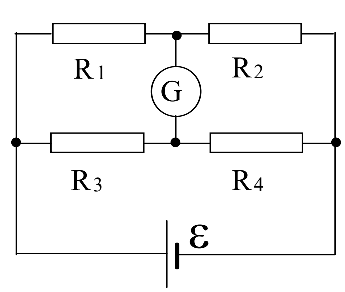

Рис.13

3.149. На рис.14 $\mathcal{E}_1$ = 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.

3.150. На цоколе лампочки накаливания с вольфрамовой нитью накала написано: 120 В, 60 Вт. При измерении сопротивления этой лампочки в холодном состоянии оказалось, что оно равно всего
20 Ом. Найти нормальную температуру t накала нити.

3.151. По прямому медному проводу длиной 1000 м и сечением
1 мм^2 проходит ток 4,5 А. Считая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон, найти время, за которое электрон переместится от одного конца провода к другому.

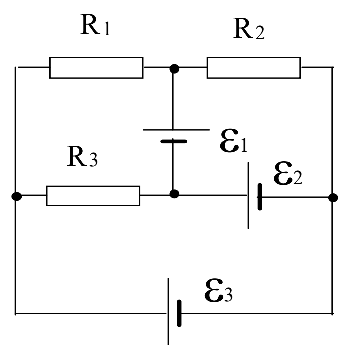

Рис.14

3.152. По медному проводу сечением 0,17 мм^2 проходит ток силой 0,15 А. Определить силу, действующую на отдельные свободные электроны со стороны электрического поля.

3.153. Определить удельное сопротивление ρ проводника длиной l = 2 м, если при плотности тока $j = 10^6$ А/м^2 на его концах поддерживается разность потенциалов U = 2 В.

3.154. Найти сопротивление изоляции на один метр длины провода R_1 диаметром d = 2 мм, если диаметр наружной проводящей оболочки равен d_1 = 4 мм, а удельное сопротивление фарфоровой изоляции $\rho = 10^{13}$ Ом · м.

3.155. Имеется лампочка мощностью P = 40 Вт на напряжение U = 120 В. Какое добавочное сопротивление R надо включить последовательно с лампочкой, чтобы она давала нормальный накал при напряжении в сети U_0 =220 В? Сколько метров l нихромовой проволоки диаметром d = 0,3 мм надо взять, чтобы получить такое сопротивление?

3.156. К источнику тока с ЭДС $\mathcal{E}$ = 1,5 В присоединили катушку с сопротивлением R = 0,1 Ом. Амперметр показал ток I_1 = 0,5 А. Когда к источнику последовательно присоединили еще один источник с такой же ЭДС, то сила тока I_2 в той же катушке стала равной 0,4 А. Определить внутренние сопротивления r_1 и r_2 первого и второго источников.

3.157. 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.

3.158. 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 рис.15. Найти силу тока в батарее и реостате.

3.159. 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 рис.16. Найти силу тока, текущего через реостат.

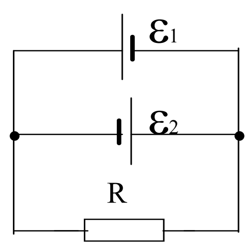

Рис.15

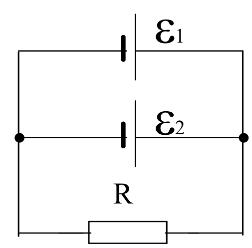

Рис.16

3.160. Три батареи с ЭДС $\mathcal{E}_1$ = 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.

3.161. 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 рис.17. Определить силы токов в реостатах.

3.162. Определить величину общего тока в цепи (рис.18) 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, R_2 = 2 Ом.

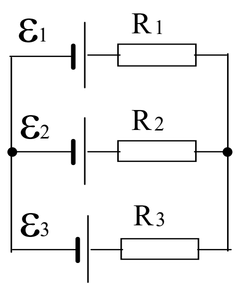

Рис.17

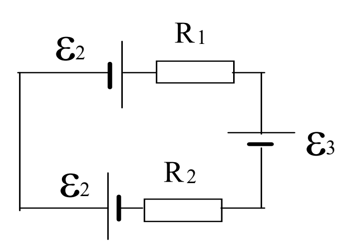

Рис.18

3.163. В цепи (рис.19) $\mathcal{E}$ = 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.

3.164. Найти величину тока, проходящего через каждый из элементов (рис.20), 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.

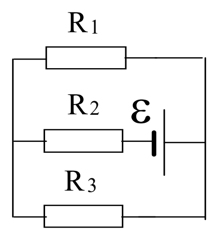

Рис.19

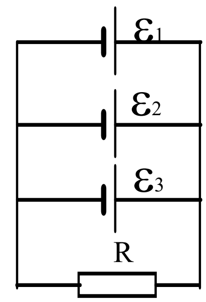

Рис.20

3.165. 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 рис. 21. Определить напряжения на сопротивлениях R_1 = 5 Ом, R_2 = 1 Ом и R_3 = 3 Ом.

3.166. Найти величины токов во всех участках цепи (рис.22), 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.

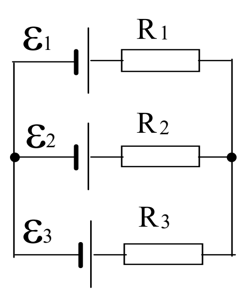

Рис. 21

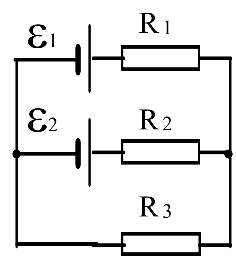

Рис. 22

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

3.168. 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?

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

3.170. Лифт массой 0,8 т поднимается 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 %.

3.172. 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 теплоемкость воды равна 4190 Дж/(кг · К). Удельная теплота плавления льда - 0,33 Мдж/кг, удельная теплота паросообразования воды - 2,25 МДж/кг.

3.173. Спираль калориметра сопротивлением 60 Ом и резистор сопротивлением 40 Ом соединены параллельно и замкнуты на источник с ЭДС 120 В и внутренним сопротивлением 6 Ом. На сколько градусов нагреется в калориметре 0,5 кг воды за 6 мин? Удельная теплоемкость воды равна 4190 Дж/(кг · К).

3.173. В цепь из медного провода с поперечным сечением 3 мм^2 включен свинцовый предохранитель с поперечным сечением 1 мм^2. На какое повышение температуры рассчитан этот предохранитель? Начальная температура свинца 290 К. Теплоотдачей в окружающую среду пренебречь. Удельная теплоемкость свинца равна 130 Дж/(кг · К). Температура плавления свинца 600 К. Удельная теплота плавления 30 кДж/кг.

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

3.175. Сила тока в проводнике сопротивлением R = 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.

3.176. 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.

3.177. 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.

3.178. 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?

3.179. 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?

3.180. Два провода изготовлены из одного и того же материала, имеют одинаковую длину, но диаметр одного больше 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?

3.181. 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?

3.182. Имеются две проволоки квадратного сечения, изготовленные из одного и того же материала. Сторона сечения одной проволоки равна 1 мм, а другой - 4 мм. Для того чтобы расплавить первую проволоку, нужно пропустить через нее ток I_1 = 10 А. Какой ток I_2 нужен, чтобы расплавить вторую проволоку?

3.183. Электрический чайник с 600 г воды при 18^0С, 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 теплоемкость воды равна 4190 Дж/(кг · К). Удельная теплота парообразования - 2,26 МДж/кг.

3.184. Какого сечения необходимо взять свинцовый предохранитель, если известно, что он должен плавиться при повышении на 10 ^{0}С температуры проводки, выполненной из медного провода сечением 5 мм^2? Начальная температура 20^0С. Теплоотдачей в окружающую среду пренебречь. Удельная теплоемкость свинца равна
130 Дж/(кг · К), меди - 380 Дж/(кг · К. Температура плавления свинца 600 К. Удельная теплота плавления 30 кДж/кг.

3.185. Электрический чайник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в чайнике закипает через 10 мин, при включении другой - через 20 мин. Через сколько времени закипит вода в чайнике, если включить обе обмотки: 1) последовательно; 2) параллельно?

3.186. 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.

3.187. 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.

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

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

3.190. Определить работу выхода электрона из металла, если при повышении температуры от 2400 К до 2500 К ток насыщения термоэлектронной эмиссии возрастает 2,6 раза.

3.191. Во сколько раз изменится удельная термоэлектронная эмиссия вольфрама, находящегося при температуре 2400 К, если его температуру повысить на 200 К? Работа выхода электрона для вольфрама равна 4,5 эВ.

3.193. 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 · К^2), а для торированного вольфрама - 3 А/(см^2 · К^2). Работа выхода электрона для чистого вольфрама равна 4,5 эВ, для торированного - 2,63 эВ.

3.194. Азот ионизируется рентгеновским излучением. Определить проводимость азота, если в каждом кубическом сантиметре газа находится в условиях равновесия 10^7 пар одновалентных ионов.

3.195. Воздух между плоскими электродами ионизационной камеры ионизируется рентгеновским излучением. Сила тока, текущего через камеру, I = 1,2 мкА. Площадь каждого электрода S = 300 см^2, расстояние между ними d =2 см, разность потенциалов U = 100 В. Найти концентрацию n пар ионов Заряд каждого иона равен элементарному заряду.

3.196. 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.

3.197. В электронной лампе ток насыщения достигает 2,86 мА при температуре вольфрамового волоска катода 2 кК. 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.

3.198. Найти сопротивление R трубки длиной l = 84 см и площадью поперечного сечения S = 5 мм^2, если она наполнена водородом, ионизированным так, что в 1 см^3 его находятся при равновесии n = 10^7 пар одновалентных ионов.

3.199. В атмосфере вблизи поверхности Земли из-за радиоактивности почв и космического излучения за 1 с в 1 см^3 воздуха образуется в среднем 5 пар ионов. Найти силу тока насыщения $I_{нас}$ между плоскими электродами площадью S = 100 см^2, расположенными на расстоянии d = 10 см. Ионы считать одновалентными.

3.200. К высоковольтному источнику через резистор сопротивлением R = 1 МОм подключен плоский конденсатор емкость которого C = 9 пФ. Расстояние между пластинами которого d = 3 см. Воздух в пространстве между пластинами ионизируется рентгеновским излучением так, что в каждом кубическом сантиметре находится в 1 с образуется 10^4 пар одновалентных ионов. Заряд иона равен заряду электрона. Найти падение напряжения U на сопротивлении R, считая, что между пластинами конденсатора установился ток насыщения.

5. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

Основные законы и формулы

Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I\left[d\vec{l} \times \vec{r}\right]}{r^3},$$

где $d\vec{B}$ - магнитная индукция поля, создаваемого элементом длины $d\vec{l}$ проводника с током I; $\vec{r}$ - радиус-вектор, проведённый от $d\vec{l}$ до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Модуль вектора $d\vec{B}$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где α - угол между векторами $d\vec{B}$ и $d\vec{l}$.

Принцип суперпозиции (наложения): магнитная индукция результирующего поля равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, т.е.

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

В частном случае наложения двух полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2,$$

а модуль магнитной индукции

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + 2B_1 B_2 \cos\alpha},$$

где α - угол между векторами магнитной индукции отдельных полей.

Магнитная индукция B связана с напряженностью магнитного поля H (в случае однородной, изотропной среды) соотношением

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

или в вакууме

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}.$$

Магнитная индукция поля, создаваемого бесконечно длинным прямым проводником с током,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{r},$$

где r - расстояние от оси проводника до рассматриваемой точки поля.

Магнитная индукция поля в центре кругового проводника с током

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}.$$

Магнитная индукция поля, создаваемого отрезком проводника,

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} \left(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2\right).$$

Обозначения ясны из рис. 23

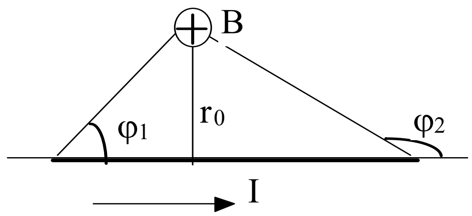

Рис. 23

Закон Ампера. Сила, действующая на элемент длины $d\vec{l}$ проводника с током I в магнитном поле с индукцией B

$$d\vec{F} = I\left[d\vec{l} \times \vec{B}\right].$$

Модуль силы Ампера

$$dF = IBdl\sin\alpha,$$

где α - угол между векторами $\vec{B}$ и $d\vec{l}$.

Сила взаимодействия двух прямых бесконечных прямолинейных параллельных проводников с токами I_1 и I_2

$$dF = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{2I_1I_2}{R}dl,$$

где R - расстояние между проводниками, dl - длина отрезка проводника.

Магнитное поле точечного заряда q, свободно движущегося с нерелятивистской скоростью v,

$$B = \frac{\mu_0\mu}{4\pi}\frac{qv\sin\alpha}{r^2},$$

где r - модуль радиус-вектора, проведённого от заряда к точке наблюдения; α - угол между вектором скорости и радиус-вектором.

Механический момент, действующий на контур с током, помещённый в однородное магнитное поле,

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B}\right],$$

где $\vec{p}_m$ - магнитный момент контура площадью S с током I,

$$\vec{p}_m = IS\vec{n},$$

$\vec{n}$ - единичный вектор нормали к плоскости контура.

Сила Лоренца, действующая на заряд q, движущийся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B,

$$\vec{F} = q\left[\vec{v} \times \vec{B}\right] \quad \text{или} \quad F = |q| vB\sin\alpha,$$

где α - угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля.

Холловская поперечная разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \frac{1}{en}\frac{IB}{d},$$

где I - сила тока; B - магнитная индукция; d - толщина пластинки; n - концентрация носителей заряда.

<u>Закон полного тока для магнитного поля в вакууме</u> (теорема о циркуляции вектора магнитной индукции)

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \oint_L B_l \, dl = \mu_0 \sum_{k=1}^{n} I_k,$$

где $d\vec{l}$ - вектор элементарной длины контура, направленный вдоль обхода контура; B_l - составляющая вектора магнитной индукции в направлении касательной контура L произвольной формы; μ_0 - магнитная постоянная;

$\sum_{k=1}^{n} I_k$ - алгебраическая сумма токов, охватываемая контуром.

Магнитная индукция поля внутри соленоида (в вакууме), имеющего N витков и длину l,

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}.$$

Магнитная индукция поля внутри тороида (в вакууме)

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2\pi r}.$$

Поток вектора магнитной индукции (магнитный поток) через элементарную площадку dS

$$d\Phi_B = \vec{B} d\vec{S} = B_n dS,$$

где B_n - проекция вектора магнитной индукции на направление нормали к площадке dS.

Поток вектора магнитной индукции через плоский контур площадью S:

в случае неоднородного поля

$$\Phi_B = \int_S B_n dS,$$

в случае однородного поля

$$\Phi_B = B_n S = BS\cos\alpha,$$

где α - угол между вектором нормали к плоскости контура и вектором магнитной индукции; B_n - проекция вектора магнитной индукции на нормаль.

Потокосцепление, т.е. полный магнитный поток, сцеплённый со всеми N витками соленоида или тороида,

$$\Psi = N\Phi,$$

где Φ - магнитный поток через один виток.

Для соленоида

$$\Phi = \mu_0 \mu \frac{N^2 I}{l} S,$$

где μ - магнитная проницаемость среды.

Работа по перемещению проводника с током I в магнитном поле

$$A = I\Delta\Phi,$$

где $\Delta\Phi$ - магнитный поток, пересечённый движущимся проводником.

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле

$$A = I\Delta\Psi,$$

где I - сила тока в контуре; $\Delta\Psi$ - изменение потокосцепления контура.

Основной закон электромагнитной индукции (закон Фарадея)

$$\varepsilon_i = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt},$$

где ε_i - ЭДС индукции; N - число витков контура.

Частные случаи применения закона электромагнитной индукции:

а) ЭДС индукции, возникающая в рамке, содержащей N витков, площадью S при вращении рамки с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле с индукцией B,

$$\varepsilon_i = BNS\sin\omega t;$$

б) разность потенциалов U на концах проводника длиной l, движущегося со скоростью v в однородном магнитном поле с индукцией B,

$$U = Blv\sin\alpha,$$

где α - угол между вектором скорости и вектором индукции магнитного поля.

Количество электричества q, протекающего в контуре,

$$q = \frac{\Delta\Psi}{R},$$

где R - сопротивление контура; $\Delta\Psi$ - изменение потокосцепления.

ЭДС самоиндукции, возникающая в замкнутом недеформируемом контуре при изменении силы тока в нём,

$$\varepsilon_s = -L\frac{dI}{dt},$$

где L - индуктивность контура.

Потокосцепление контура индуктивностью L с током I

$$\Psi = LI.$$

Индуктивность соленоида (тороида)

$$L = \mu_0\mu\frac{N^2S}{l},$$

где N - число витков соленоида; S - площадь поперечного сечения; l - длина соленоида. При вычислениях индуктивности соленоида с ферромагнитным сердечником по приведенной формуле для определения магнитной проницаемости следует предварительно воспользоваться графиком зависимости B от H (рис. 24), а затем формулой

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}.$$

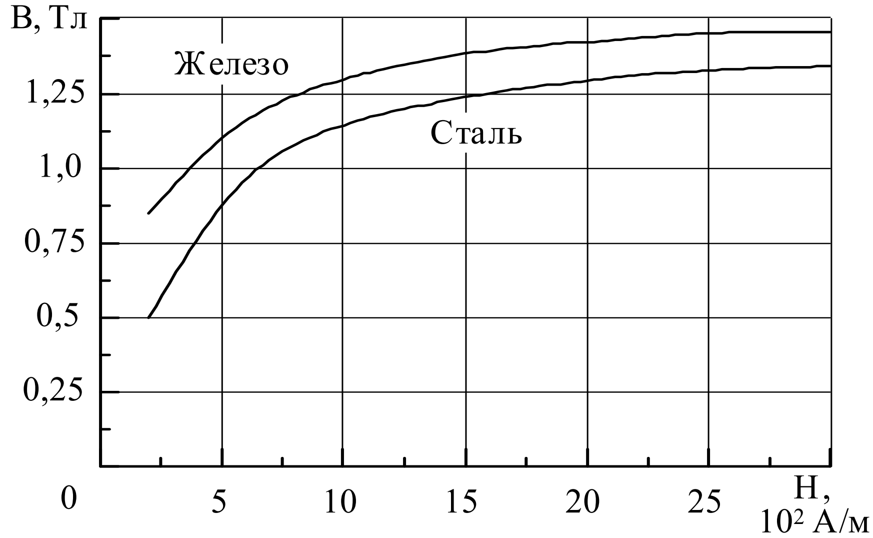

Рис. 24

Мгновенное значение силы тока в цепи при размыкании и при замыкании цепи

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{R}{L}t\right); \qquad I = \frac{\varepsilon}{R}\left(1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right),$$

где ε - ЭДС источника тока; I_0 - сила тока в цепи при $t = 0$; R - активное сопротивление цепи; L - индуктивность цепи.

Энергия магнитного поля, связанного с контуром индуктивностью L, по которому течёт ток силой I,

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Объёмная плотность энергии однородного магнитного поля

$$w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} = \frac{BH}{2}.$$

Связь орбитального магнитного $\vec{p}_m$ и орбитального $\vec{L}_e$ механического моментов электрона

$$\vec{p}_m = -g\vec{L}_e,$$

где g = e/2m - гиромагнитное отношение орбитальных моментов.

Намагниченность

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{\sum \vec{p}_m}{V},$$

где $\vec{P}_m$ - магнитный момент магнетика, равный векторной сумме магнитных моментов отдельных молекул.

Связь между намагниченностью и напряженностью магнитного поля

$$\vec{J} = \chi\vec{H},$$

где χ - магнитная восприимчивость вещества.

Связь между векторами $\vec{B}$, $\vec{H}$, $\vec{J}$

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J}),$$

где μ_0 - магнитная постоянная.

Связь между магнитной проницаемостью и магнитной восприимчивостью вещества

$$\mu = 1 + \chi.$$

Закон полного тока для магнитного поля в веществе

$$\oint_L \vec{H}d\vec{l} = I,$$

где I - алгебраическая сумма сил токов проводимости, охватываемых контуром L.