

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ФИЗИКА

ВВОДНЫЙ КУРС

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2019

УДК 531 (075.8)
Ф 503

Коллектив авторов:

*Н.Ю. Петров, Е.И. Кренева, Н.В. Тарасенко,
В.Я. Костюченко, М.Р. Мирсияпов*

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор *Л.А. Борыняк*
канд. техн. наук, доцент *В.В. Христофоров*

Работа подготовлена на кафедре общей физики для студентов
I–II курсов

Ф 503 **Физика. Вводный курс. Электростатика и законы постоянного тока:** учебное пособие / Н.Ю. Петров, Е.И. Кренева, Н.В. Тарасенко, В.Я. Костюченко, М.Р. Мирсияпов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – 114 с.

ISBN 978-5-7782-3829-9

Пособие посвящено основам электростатики и законам постоянного тока и охватывает такие темы, как закон Кулона, напряженность и потенциал электрического поля, емкость, законы постоянного тока. К каждой теме в пособии приведен теоретический материал, указания к решению задач, примеры их решения и трехуровневые задачи для самостоятельного решения.

Изложенный в пособии материал позволяет студентам за сравнительно небольшой срок повторить теорию и получить основные сведения о методах решения задач по разделу «Электричество» для последующего изучения общей физики в рамках курса «Физика» в техническом вузе.

Предназначено для студентов младших курсов, в учебной программе которых предусмотрен вводный курс по физике. Кроме того, может быть полезно для абитуриентов и преподавателей физики.

УДК 531 (075.8)

ISBN 978-5-7782-3829-9

© Коллектив авторов, 2019
© Новосибирский государственный
технический университет, 2019

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее пособие представляет собой серию работ, предназначенных для студентов младших курсов Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), в программу которых включен *вводный курс по физике*.

Предыдущие работы [1, 2] охватывают *классическую механику, основы молекулярной физики и термодинамику*. В частности, в работе [1] были рассмотрены такие разделы механики: кинематика и динамика материальной точки и поступательного движения твердого тела, кинематика вращательного движения твердого тела, законы сохранения механической энергии и импульса. Особое внимание в ней было уделено понятиям физической величины, единицы измерения, размерности физической величины, системе отсчета. Кроме того, в пособии [1] приведены основы математического аппарата в объеме, необходимом для освоения данного курса.

Учебное пособие [2] посвящено основам молекулярной физики и термодинамики. В нем рассмотрены следующие разделы: основные принципы молекулярно-кинетической теории, уравнение состояния идеального газа, газовые законы, первый закон термодинамики, циклы, уравнение теплового баланса, влажность воздуха, капиллярные явления.

В настоящем пособии изучаются основы *электростатики и законы постоянного тока*. Рассмотрены следующие темы.

1. Закон Кулона.
2. Напряженность и потенциал электрического поля.
3. Емкость.
4. Законы постоянного тока.

К изучению изложенных в книге сведений желательно приступить после изучения работ [1 и 2]. При этом стоит отметить, что настоящее учебное пособие имеет самостоятельное значение, поскольку оно содержит краткие теоретические сведения по основам электростатики и законам постоянного тока, вопросы для самоконтроля, указания к решению задач, примеры их решения и трехуровневые задачи для самостоятельного решения. В пособии также приведены тестовые задания для подготовки к итоговому тестированию, которое предусмотрено в конце вводного курса.

Предлагаемое пособие позволяет студентам за сравнительно небольшой срок повторить теоретический материал и получить общие сведения о методах решения физических задач.

Работу с книгой рекомендуем начать с изучения теоретического материала к соответствующему разделу. Читатель должен уделить особое внимание освоению физических понятий, без знания которых не имеет никакого смысла приступать к решению задач.

Следует отметить, что в учебном пособии приведены только **краткие** теоретические сведения, которые предназначены для **повторения** фундаментальных понятий и законов рассматриваемых разделов физики. Для более глубокого изучения нужно воспользоваться классическим учебником по общей физике для технических вузов.

На следующем этапе следует проверить, насколько хорошо вы усвоили теоретический материал. Для этого в пособии предусмотрены вопросы для самоконтроля. Эти вопросы помогут читателю выявить пробелы в знаниях и впоследствии устранить их.

Как только у вас появится уверенность, что в достаточной мере владеете теорией, переходите к изучению указаний к решению задач. В них выделены наиболее существенные моменты и сформулированы общие подходы к решению физических задач по электростатике и законам постоянного тока.

Внимательно ознакомьтесь с примерами решения задач, которые приведены в каждом разделе. В примерах подробно описаны алгоритмы решения типовых задач. После изучения примера попробуйте **самостоятельно** воспроизвести решение рассматриваемой задачи. Проанализируйте, какие моменты или этапы решения вызвали у вас затруднения.

На следующем этапе перейдите к решению задач, приведенных в конце каждого раздела. При возникновении трудности в решении задач вернитесь к предыдущим этапам (*теория* → *методические указания* → *примеры*).

Задания для подготовки к итоговому тестированию приведены в конце пособия в приложении А. При выполнении заданий постарайтесь не пользоваться вспомогательными материалами. Проанализируйте, какие задачи вызвали у вас наибольшие затруднения. Повторите необходимый теоретический материал, посмотрите примеры решения подобных задач.

Предисловие, приложения и раздел 1 написаны Н.Ю. Петровым, раздел 2 – М.Р. Мирсияповым, раздел 3 – Е.И. Креновой, раздел 4 – Н.В. Тарасенко, раздел 5 – В.Я. Костюченко.

Авторы выражают глубокую благодарность за ряд полезных советов и замечаний доценту В.В. Христофорову.

В качестве вспомогательной литературы можно воспользоваться пособием [3].

1. КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ИСХОДНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Изучение электрических явлений можно разбить на три части. Первая часть включает в себя вопросы, касающиеся понятийного аппарата и общих принципов, необходимых для описания электрических явлений. На втором этапе рассматриваются электрические свойства вещества, и, наконец, на третьем этапе обсуждаются вопросы практического применения электрических явлений.

Пособие посвящено изучению вопросов, относящихся к первой части. Основные понятия классической теории электромагнетизма – понятие *электрического заряда* и понятие *электромагнитного поля*. Прежде чем перейти к рассмотрению этих терминов, следует вспомнить некоторые исторические факты, касающиеся электрических зарядов.

Слово *электричество* происходит от слова *электрон*, которым древние греки называли янтарь. Уже во времена Фалеса в VII веке до н. э. было известно, что янтарь, потертый о шерсть, притягивает легкие предметы. Однако долгое время знание об электричестве не шло дальше этого представления. Термин «электрические явления» впервые ввел Уильям Гильберт¹ только в XVI веке. Кроме того, Гильберт обнаружил и другие помимо янтаря вещества, способные после натирания притягивать легкие предметы. Он назвал их «наэлектризованными».

В 1729 году французский ученый физик Шарль Дюфе установил существование двух типов зарядов: «стеклянного» и «смоляного», которые выявлялись при трении стекла о шелк и смолы о шерсть.

¹ **Уильям Гильберт** (англ. William Gilbert, 1544 – 1603) – английский физик, придворный врач Елизаветы I и Якова I.

Первую теорию электричества создал Бенджамин Франклин², который предложил общепринятое теперь обозначение электрически заряженных состояний «+» (**положительное**) и «-» (**отрицательное**). Он установил также тождество атмосферного и получаемого с помощью трения электричества и привел доказательство электрической природы молнии с использованием воздушного змея, запущенного в грозу.

В 1785 году французский военный инженер и ученый-физик Шарль Кулон открыл свой знаменитый закон, названный в его честь *законом Кулона*. После открытия этого закона изучение электричества переходит в категорию точной науки.

В 1910 году американский физик Роберт Милликен в результате проведенных экспериментов с заряженными капельками масла измерил заряд электрона и показал, что электрический заряд *квантован*. Квантованность заряда рассмотрим чуть позже.

В XX веке была создана теория квантовой электродинамики, в основу которой положены работы Р. Фейнмана, Д. Швингера, С. Томонаги, Ф. Дайсона. А в конце 60-х годов XX века С. Вайнберг, А. Салам и Ш. Глэшоу создали объединенную теорию электрослабых взаимодействий.

После исторического экскурса перейдем к рассмотрению основных понятий, необходимых для дальнейшего изучения курса. Начнем с термина электрический заряд.

Из курса физики средней школы читателю должно быть известно, что существует четыре вида фундаментальных взаимодействий между элементарными частицами и составленными из них телами: *гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное* [4].

Каждый вид взаимодействия связан с определенной характеристикой частицы. Например, гравитационное взаимодействие связано с массой частицы (тела), а электромагнитное – с электрическими зарядами [5]. Сказанное выше следует понимать в том смысле, что у каждой частицы или тела есть некоторые свойства (характеристики), подобно тому, как каждый человек обладает своим типом характера, определяющим его взаимодействие с другими людьми. Заряд, как физическая величина, был введен для описания неотъемлемого свойства

² **Бенджамин Франклин** (англ. Benjamin Franklin; 1706 – 1790) – американский политический деятель, дипломат, физик, изобретатель, писатель, журналист, издатель, один из авторов американской Конституции.

некоторых типов частиц взаимодействовать между собой определенным образом.

Стоит отметить, что электрический заряд является **фундаментальным**³ понятием, которое нельзя определить через другие физические термины. Можно сказать, что *электрический заряд* – это скалярная физическая величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия между частицами или телами, обладающими этим свойством [5]. Величина электрического заряда определяет значение сил и энергий при электромагнитном взаимодействии. В СИ (международная система единиц измерения физических величин) единицей заряда является один кулон⁴ (1 Кл). Электрический заряд обозначается латинскими буквами q , Q .

Мы дали **качественное** представление об электрическом заряде, теперь рассмотрим вопрос описания заряда с **количественной** стороны. **Количественное определение любой физической величины сводится к указанию принципиального способа их измерения** [6].

Электрические заряды (движущиеся и неподвижные) формируют в пространстве *электромагнитное поле*, которое проявляется в силовом воздействии на материальные тела, обладающие электрическим зарядом. *Электромагнитное поле* представляет собой совокупность взаимосвязанных *электрического* и *магнитного поля*. Раздел классической физики, в котором изучаются законы электромагнитного поля, называется *электродинамикой*. Электрическое поле неподвижных зарядов (заряженных тел), осуществляющее взаимодействие между ними, носит название *электростатического поля*. Такое поле не изменяется во времени, т. е. является *стационарным полем*. Теории электростатических полей посвящен раздел электродинамики, который называется *электростатика*.

Рассмотрим некоторое электростатическое поле, созданное системой заряженных тел. Поместим в это поле заряженные тела. В общем случае электрическое поле может значительно исказиться вблизи заряженного тела, что не соответствует принципам организации процесса

³ **Фундаментальные физические понятия** – это основные термины, на которых построены модели теоретической физики, т. е. все то, что на данный момент считается неразложимыми и неделимыми явлениями природы.

⁴ **Кулон** – это величина заряда, прошедшего через проводник при силе тока 1 А за время 1 с. Через основные единицы СИ кулон выражается следующим образом: 1 Кл = 1 А·с .

измерения физической величины. Поэтому заряд этих тел должен быть настолько мал, чтобы они не вызывали перераспределение зарядов на окружающих телах вследствие *электростатической индукции*⁵. Такие тела называются *пробными телами*⁶, или *пробными зарядами*. Иначе говоря, *пробный заряд* – это заряд, который настолько мал по величине, что его внесение в электрическое поле не вызывает изменения значений и перераспределения в пространстве электрических зарядов, создающих это поле [7].

Выберем произвольную точку пространства, в котором создано электростатическое поле. Обозначим эту точку буквой *A*. Поочередно поместим в эту точку два пробных заряда q_1 и q_2 . Для того чтобы избавиться от возможного влияния формы и размеров носителей заряда, они должны быть *точечными*. *Точечный заряд* – это заряд, размерами носителя которого по сравнению с расстоянием, на котором рассматривается электростатическое взаимодействие, можно пренебречь [7]. Таким образом, q_1 и q_2 должны быть **точечными пробными зарядами**. На каждый из зарядов действовало одно и то же внешнее электростатическое поле. Обозначим силы, действовавшие на каждый из неподвижных зарядов q_1 и q_2 , как F_1 и F_2 соответственно. Из **экспериментальных фактов** следует: 1) эти силы *коллинеарные*, т. е. либо сонаправлены, либо направлены противоположно; 2) отношение модулей сил F_1/F_2 (или F_2/F_1) не зависит от положения точки *A* и определяется только величиной этих зарядов. Таким образом, отношение F_1/F_2 характеризует сами пробные заряды и не зависит от электростатического поля, в которое эти заряды помещены.

Отношение зарядов двух пробных тел, поочередно помещенных в одну и ту же точку поля, равно отношению модулей действующих на них сил:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{F_1}{F_2}.$$

⁵ *Электростатическая индукция* – явление наведения (возникновения) собственного электростатического поля при действии на тело внешнего электрического поля. Оно обусловлено перераспределением зарядов внутри проводящих тел, а также *поляризацией* внутренних микроструктур у непроводящих тел (*диэлектриков*).

⁶ Часто в качестве пробного используют положительный заряд [8].

Следует учесть, что если силы сонаправлены, то зарядам приписывают одинаковый знак, а если направления силы противоположны, то и знаки зарядов противоположны.

Если условно принять заряд какого-либо тела за единицу (ввести эталон), то измерением отношения модулей сил F_1/F_2 , действующих на второе тело и на эталон, можно определить величину заряда второго тела в выбранных единицах.

Описав способ измерения электрического заряда тела, мы охарактеризовали его с количественной стороны.

Перечислим свойства, присущие заряду, которые носят фундаментальный характер [9]:

1) электрическому заряду приписывают знак: положительный (+) или отрицательный (–);

2) заряды (точнее, **носители зарядов**) одного знака (*одноименные заряды*) отталкиваются друг от друга, а заряды противоположных знаков (*разноименные заряды*) притягиваются друг к другу;

3) в любой **электрически изолированной**⁷ системе алгебраическая сумма зарядов не изменяется. Это утверждение выражает *закон сохранения электрического заряда*, который получен эмпирическим путем;

4) электрический заряд тела или системы тел не зависит от выбора **инерциальной** системы отсчета, в которой он измеряется. Заряд *инвариантен* относительно перехода от одной инерциальной системы отсчета к другой, это значит, что его величина не зависит от того, движется заряд или покоится;

5) электрический заряд **квантован**, т. е. заряд тела кратен **элементарному электрическому заряду**⁸: $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, равному заряду протона и **абсолютному** значению заряда электрона;

6) заряд аддитивен, это значит, что полный заряд системы q , содержащей n зарядов e_i , равен их алгебраической сумме: $q = \sum_{i=1}^n e_i$.

Рассмотрим каждое из свойств подробнее.

Как уже было сказано, в природе существует два рода электрических зарядов, которые принято называть: **положительные** и **отрицательные**. Например, положительный заряд возникает на стекле, натер-

⁷ **Электрически изолированной системой** называется система, которая не обменивается электрическими зарядами с внешними телами.

⁸ Элементарный заряд обычно берется с **положительным знаком**.

том кожей, а отрицательный – на эбоните или янтаре, натертом шерстью. О процессе возникновения у тела заряда мы поговорим чуть позже, а сейчас отметим, что наименьшая по массе и **устойчивая в свободном состоянии** частица, которая является носителем элементарного **отрицательного** электрического заряда, – это *электрон*. Наименьшая по массе и **устойчивая в свободном состоянии** частица, которая является носителем элементарного **положительного** электрического заряда, – это *протон*. Масса протона больше массы электрона примерно в 1836 раз (см. приложение Б).

Наименьшая по массе и **устойчивая в свободном состоянии** *античастица*, которая является носителем элементарного **положительного** электрического заряда, – это *позитрон*⁹.

Электроны и протоны входят в состав всех атомов и молекул. Атомы и молекулы **электронейтральны** – их полный (суммарный) заряд равен нулю. Системы, состоящие из заряженных тел, называются **электрически нейтральными**, если их суммарный заряд равен нулю (суммарный положительный заряд равен суммарному отрицательному заряду). В процессе взаимодействия (например, электромагнитного) нейтральность систем (тел) может быть нарушена. Рассмотрим подробнее механизмы **электризации**¹⁰ тел.

Механизмы электризации тел могут быть различны: например, трением, через влияние, ударом, под действием электромагнитного излучения (**фотоэлектрический эффект**), химическим взаимодействием и т. д. Мы остановимся на первых двух [10].

Электризация трением (**трибоэлектрический эффект**), заключается в появлении электрических зарядов в материале из-за трения. Трибоэлектрический эффект является частным случаем «контактной электризации». Само по себе трение в большинстве случаев (если нагревание поверхностей и их разрушение не важно) не играет роли. Важно «тесное»¹¹ соприкосновение тел.

⁹ Позитрон является античастицей электрона и имеет равную с ним массу. **Античастицей** некоторой элементарной частицы называется «частица-двойник», обладающая той же массой и тем же спином и рядом других физических характеристик, отличающаяся от неё знаками некоторых характеристик взаимодействия (например, электрическим зарядом) [4].

¹⁰ **Электризация** – явление приобретения телом электрического заряда, отличного от нуля.

¹¹ Сближение тел на расстояния, соизмеримые с эффективными размерами атомов.

На сегодняшний день нет полноценной и всеобъемлющей теории электризации. Сложность объяснения заключается в том, что механизмов электризации при контакте тел может быть несколько, и отделить их один от другого зачастую невозможно. Кроме того, в процессе экспериментов сложно постоянно контролировать частоту поверхности трущихся тел, что может привести к ложным результатам. Рассмотрим два варианта объяснения электризации трением.

Первая версия (более подробно см. в [11]). Электрические силы, которые удерживают электроны внутри тела, для разных веществ различны. При «тесном» контакте относительно небольшая часть электронов вещества, у которого связь электронов с телом относительно слаба, переходит на другое тело. Если тела разъединить, то оба они окажутся заряженными. Как уже было сказано, для того чтобы между телами происходил обмен электронами, необходим тесный контакт. Так как поверхности тел никогда не бывают идеальными (всегда есть неровности, шероховатости), то необходимый для перехода контакт между телами устанавливается только на небольших участках поверхностей. Поскольку при трении тел между собой число участков с тесным контактом увеличивается, увеличивается и общее число заряженных частиц, переходящих от одного тела к другому.

При таком подходе нельзя объяснить, как происходит электризация в таких *диэлектриках* (это понятие мы рассмотрим позже), как эбонит, плексиглас и других, у которых электроны связаны в нейтральных молекулах.

Вторая версия (более подробно см. в [12]). Рассмотрим альтернативное объяснение механизмов электризации на примере ионного кристалла LiF. **При образовании кристалла возникают различного рода дефекты**, например, незаполненные места в узлах кристаллической решетки (*вакансии*). Если число вакансий для положительных *ионов*¹² лития и отрицательных фтора неодинаково, то кристалл окажется при образовании **заряженным по объему**. Но поскольку в окружающей среде (например, в воздухе) всегда имеется некоторое количество ионов, кристалл будет их притягивать из среды до тех пор, пока его заряд не нейтрализуется поверхностным слоем ионов. У разных

¹² **Ион** – заряженная частица, в которой общее число протонов не равно общему числу электронов. Ион – это атом или молекула, потерявшие или захватившие один или несколько электронов. Положительный ион также образуется при присоединении протона.

диэлектриков (*изоляторов*) объемные заряды различны, и поэтому различны заряды поверхностных слоев ионов. В процессе трения поверхностные слои ионов перемешиваются, и при разъединении изоляторов каждый из них оказывается заряженным.

Естественно, возникает вопрос: возможна ли электризация трением двух одинаковых диэлектриков? Очевидно, что если они имеют одинаковые собственные объемные заряды, то нет. Но они могут иметь и различные собственные заряды (например, если их плотность различна или условия кристаллизации были разными). Экспериментально установлено, что электризация при трении одинаковых кристаллов рубина, янтаря действительно может происходить.

Отметим, что подобное объяснение не может быть распространено на все случаи. **Если тела состоят из молекулярных кристаллов, то появление вакансий у них не должно приводить к заряджению тела.**

Как уже было отмечено, всеобъемлющей теории электризации на сегодняшний день нет. Например, длительное время считалось, что в ходе электризации одно тело заряжается однородно положительно, а другое – однородно отрицательно. Как показано в [13], контакт некоторых полимерных соединений-диэлектриков приводит к появлению на их поверхности мозаики из микроскопических областей, имеющих разные по знаку заряды.

Нужно понимать, что механизм электризации зависит от типа контактирующих веществ: взаимодействие между твердыми телами, между твердым телом и жидкостью или газом, между жидкими телами и т. д. На процесс электризации влияет также, к какому из двух родов относятся контактирующие вещества: к *проводникам* или *диэлектрикам*.

Проводниками называют тела, в которых имеется большая концентрация *свободных носителей заряда*, т. е. заряженных частиц, которые могут под действием электрического поля перемещаться по всему проводнику и переносить энергию, полученную от этого поля (создавать *ток проводимости*). Условно к проводникам относят материалы с удельным электрическим сопротивлением (это понятие будет рассмотрено чуть позже) $\rho < 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а к *диэлектрикам* – материалы, у которых $\rho > 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Отметим, что удельное сопротивление проводников может составлять всего $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, а у лучших диэлектриков превосходить $10^{16} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Хорошими проводниками электрического тока являются металлы. Большинство элементов таблицы Менделеева – это

металлы. Свободными носителями заряда в **большинстве** металлов являются электроны.

Как видно из приведенной выше информации, к **диэлектрикам** (или **изоляторам**) относятся тела (материалы), у которых относительно небольшая концентрация свободных носителей заряда.

Рассмотрим электризацию влиянием. При поднесении заряженного тела к незаряженному *электроскопу*¹³ (рис. 1.1) можно видеть, что лепестки отклоняются еще до соприкосновения тела с проводящей сферой электроскопа. Если поднести заряженное тело к предварительно заряженному электроскопу, то его лепестки отклоняются сильнее, если тело имеет одноименный с электроскопом заряд. Если заряд тела совпадает по знаку с зарядом электроскопа, то отклонение лепестков по мере приближения тела сначала уменьшается, а затем, после прохождения нулевой отметки (угол между лепестками равен нулю), снова увеличивается. Можно сделать вывод, что заряды возникают на проводящей сфере электроскопа и стекают через металлический стержень на лепестки уже тогда, когда поблизости присутствует заряженное тело. Процесс стекания зарядов происходит **под влиянием этого тела**. Подобное явление получило название *электростатической индукции* или *электризации посредством влияния*. Возникающий при этом заряд называют **наведенным**, или **индуцированным**.

Отметим, что явление электростатической индукции обусловлено **перераспределением зарядов** внутри проводящих тел, а также **поляризацией**¹⁴ внутренних микроструктур у диэлектриков.

Подумайте, почему электронейтральные бумажки притягиваются к наэлектризованной расческе? Влияет ли на это неоднород-

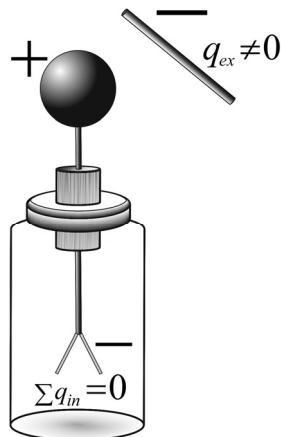


Рис. 1.1

¹³ **Электроскоп** – прибор для индикации (обнаружения) наличия электрического заряда.

¹⁴ **Поляризация диэлектриков** – физическое явление, заключающееся в относительно малом смещении связанных зарядов в диэлектрике или повороте его электрических диполей под воздействием внешнего электрического поля. Поляризация диэлектриков может происходить также под действием других внешних факторов или спонтанно.

ность электрического поля. Более подробно с видами поляризации можно ознакомиться в пособии [14].

Рассмотрены некоторые свойства заряженных тел и процесс появления электрического заряда у тел. **Другие свойства заряда будут рассмотрены на примере решения задачи о взаимодействии заряженных проводящих шаров.** Однако предварительно кратко опишем электрическое поле.

Как известно, заряженные тела являются источниками электрического поля. **Электрическое поле** – одна из составляющих *электромагнитного поля* (в квантовой электродинамике – это компонент *электрослабого взаимодействия*); особый вид материи, отличный от *вещества*¹⁵, существующий вокруг тел или частиц, обладающих электрическим зарядом, а также возникающих при изменении магнитного поля. **Электрическое поле может быть обнаружено благодаря его силовому воздействию на заряженные тела**¹⁶. Кроме того, электрическое поле обладает энергией. Поэтому для количественного описания электрического поля можно ввести две физические величины, характеризующие силовые и энергетические свойства поля.

На первый взгляд может показаться, что в качестве силовой характеристики электрического поля можно использовать силу кулоновского взаимодействия между зарядом q_1 и пробным зарядом q_2 :

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2},$$

или в векторной форме

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}},$$

где $\vec{F}_{12}$ – сила, с которой заряд 1 действует на заряд 2; q_1 , q_2 – величина точечных зарядов; $\vec{r}_{12}$ – вектор (*радиус-вектор*), направленный от

¹⁵ **Вещество** – одна из форм материи, состоящая из *фермионов* или содержащая фермионы наряду с *бозонами*. **Все, что состоит из атомов и молекул, относится к веществу.**

¹⁶ Электрическое поле создается заряженными частицами или переменным магнитным полем, но может действовать и на электрически нейтральные частицы (например, нейтроны и атомы).

заряда 1 к заряду 2 и равный по модулю расстоянию между точечными зарядами q_1 и q_2 ; k ¹⁷ – коэффициент пропорциональности ($k = 1 / (4\pi\epsilon_0) \approx 9 \cdot 10^9$ м/Ф, $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – *электрическая* (или *диэлектрическая*) *постоянная*). Сила Кулона зависит от величины пробного заряда, при изменении которого будет меняться и сила, поэтому ее нельзя использовать в качестве характеристики поля заряда q_1 . Введем следующую величину, которую назовем *напряженность электрического поля*:

$$\vec{E}_1 = \frac{\vec{F}_{12}}{q_2} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{q_2 \cdot r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}} = \left[k \frac{q_1}{r_{12}^2} \right] \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}},$$

здесь $\vec{E}_1$ – это напряженность поля q_1 в точке, где находится заряд q_2 .

Напряженность электрического поля в рассматриваемой точке – это векторная величина, которая равна отношению кулоновской силы, действующей со стороны данного электрического поля на неподвижный точечный пробный¹⁸ положительный¹⁹ заряд, помещенный в рассматриваемую точку этого поля, к величине этого заряда. Таким образом, **напряженность является силовой характеристикой электрического поля и не зависит от величины пробного точечного заряда.**

Направление вектора напряженности совпадает в каждой точке пространства с направлением силы, действующей со стороны поля на положительный пробный заряд. **Напряженность измеряется в вольтах на метр (В/м).**

Приведенная формула напряженности справедлива только для поля в вакууме так же, как и вышеуказанное математическое выражение закона Кулона. Если заряды находятся в диэлектрической среде, то вследствие поляризации этой среды меняется напряженность поля. **Может** изменяться также кулоновская сила взаимодействия между

¹⁷ В зарубежной литературе часто используется термин Coulomb's constant (постоянная Кулона).

¹⁸ Заряд должен быть точечным, чтобы можно было определить напряженность в **точке** (в которой пробный заряд испытывает действие кулоновской силы, которую мы измерили). Заряд должен быть пробным, чтобы он не вызывал перераспределения заряда вследствие электростатической индукции в окружающих телах.

¹⁹ Заряд выбирается положительным для удобства, чтобы напряженность поля в рассматриваемой точке была сонаправлена с кулоновской силой.

зарядами. Например, в **жидкой** или **газообразной** диэлектрической среде закон Кулона следует записать следующем образом:

$$\vec{F}_{12} = \frac{k}{\varepsilon} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}},$$

где ε – *относительная диэлектрическая проницаемость*, которая показывает, во сколько раз **напряженность** поля в вакууме **больше** напряженности поля в диэлектрической среде (при условии неизменности распределения и величины зарядов, создающих поле). Для краткости ε будем называть просто *диэлектрическая проницаемость среды*²⁰. Уменьшение результирующей силы взаимодействия между зарядами связано с возникновением в жидких и газообразных средах дополнительных гидростатических сил. Более подробно об этом можно прочитать в работе [15].

Напряженность поля в среде вследствие поляризации диэлектрика уменьшается в ε раз по сравнению с вакуумом (при условии неизменности распределения и величины зарядов, создающих поле). Для точечного заряда можно записать следующее:

$$\vec{E}_1 = \frac{k}{\varepsilon} \frac{q_1}{r_{12}^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}.$$

Все приведенные формулы для напряженности подходят только в том случае, если поле создано точечным зарядом либо равномерно заряженным шаром или сферой. Для того чтобы найти поле нескольких зарядов, необходимо использовать **принцип суперпозиции электрических полей** (принцип **независимости** действия электрических полей): напряженность электрического поля системы точечных зарядов равна векторной сумме напряженностей полей каждого из этих зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \frac{k}{\varepsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^3} \vec{r}_i.$$

²⁰ Вводятся *абсолютная* ε_a и *относительная* ε_r проницаемости ($\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r$). Термин «диэлектрическая проницаемость» применяется и для ε_a , и для ε_r . Для краткости одну из этих величин (в российской литературе чаще ε_r , в англоязычной ε_a) обозначают как ε .

Можно сказать, что каждый из зарядов создает в рассматриваемой точке такое поле, которое он бы создавал, если бы остальных зарядов не было.

Если заряд распределен непрерывно, то перейдя от суммирования к интегрированию по заряду, получим

$$\vec{E}(\vec{r}) = k \int_{\Gamma} \frac{\lambda(\vec{r}) d\vec{l}}{r^3} \vec{r},$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = k \int_S \frac{\sigma(\vec{r}) dS}{r^3} \vec{r},$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = k \int_V \frac{\rho(\vec{r}) dV}{r^3} \vec{r},$$

где λ , σ , ρ – линейная, поверхностная и объемная плотность зарядов соответственно. $\lambda = dq/dl$, $\sigma = dq/dS$, $\rho = dq/dV$, где dl , dS и dV – элементарная (физически бесконечно малая) длина, элементарная площадь и элементарный объем заряженного тела. Если заряд распределен по телу равномерно, то дифференциалы d можно заменить конечными разностями Δ ($dl \rightarrow \Delta l$, $dS \rightarrow \Delta S$, $dV \rightarrow \Delta V$).

Необходимость введения трех величин, описывающих плотность распределения заряда, обусловлена тем, что в случае **равновесного распределения**²¹ заряды проводника распределяются в тонком поверхностном слое. Поэтому удобнее плотность заряда описывать через поверхностную плотность (численно равна заряду единицы площади вещества). Если проводник выполнен в форме тонкой проволоки, то вводится линейная плотность (численно равна заряду единицы длины проволоки). В отличие от проводника диэлектрику можно сообщить и объемный заряд, следовательно, удобнее ввести объемную плотность заряда (численно равна заряду единицы объема вещества).

²¹ Данное утверждение справедливо и в случае стационарных токов. Макроскопические заряды при этом могут находиться только на поверхности или в местах неоднородности проводящей среды [6].

Для того чтобы на опыте исследовать, как распределяются заряды на внешней поверхности проводника, используют так называемую *пробную пластинку*, которая настолько мала, что при соприкосновении с проводником ее можно рассматривать как часть поверхности проводника. Если эту пластинку соединить с заряженным проводником, то часть заряда перейдет на нее. Заряд, перешедший на пробную пластинку, равен заряду поверхности проводника по площади, равной площади пластинки. Если затем разрядить пробную пластинку через электрометр, то можно оценить величину поверхностной плотности заряда.

Как уже было сказано, заряды проводника распределяются в тонком поверхностном слое в случае равновесного распределения. Для равновесия зарядов в проводнике необходимо выполнение следующих условий: 1) напряженность внутри проводника всюду равна нулю²²; 2) напряженность электрического поля на поверхности проводника должна быть в каждой точке направлена по нормали к поверхности²³ (поверхность проводника в условиях равновесия является *эквипотенциальной*²⁴). Если проводнику сообщить некоторый заряд, то он распределится по поверхности так, чтобы эти условия равновесия опять соблюдались [6–10].

Отметим, что носители зарядов в проводнике способны перемещаться под действием сколько угодно малой силы. Поэтому при внесении незаряженного проводника во внешнее поле носители зарядов в проводнике придут в движение. В результате у концов проводника возникнут индуцированные заряды противоположного знака. Внутри проводника образуется собственное электрическое поле, направленное так, чтобы «ослабить» внешнее поле. Перераспределение зарядов происходит до тех пор, пока не будут выполнены условия равновесия зарядов в проводнике (пока не будет достигнуто равновесное распределение зарядов).

²² Обратное означало бы появление электрической силы, пропорциональной напряженности электрического поля, которая вызвала бы движение зарядов.

²³ Это условие означает, что поверхность проводника в условиях равновесия является *эквипотенциальной*. В противном случае вдоль поверхности проводника протекал бы ток.

²⁴ Понятие эквипотенциальная поверхность будет рассмотрено далее по тексту.

Все сказанное выше означает, что внутри проводника, находящегося в электростатическом поле, вследствие перераспределения заряда на его поверхности **напряженность поля равна нулю**, вне зависимости от того, заряжен проводник или нет.

Мы рассмотрели, как найти напряженность поля в точке. Для того чтобы описать электрическое поле, нужно задать вектор напряженности в каждой точке поля. Для этого нужно математически задать зависимость напряженности поля от координаты. Однако есть и более наглядный способ визуализации поля – графический. Графически электрическое поле принято изображать с помощью силовых линий. **Силовая линия** (линия вектора напряженности поля) – это линия, проведенная в электрическом поле так, что направление касательной в любой точке совпадает с направлением вектора напряженности поля, а густота линий (число силовых линий, проходящих через единицу площади поверхности, перпендикулярной к силовым линиям) должна быть пропорциональна величине напряженности поля в данном месте [14].

Можно было бы изображать поле с помощью векторов напряженности, проведенных в различных точках поля. Однако такой метод неудобен, поскольку в результате наложения векторов напряженности картина поля становится смазанной и непонятной. Метод изображения электрических полей с помощью силовых линий был предложен английский физиком и химиком Майклом Фарадеем. Рассмотрим подробнее, как построить силовую линию.

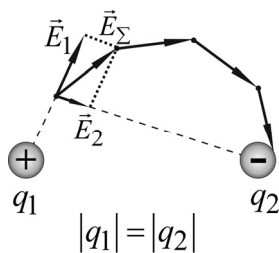


Рис. 1.2

Пусть имеется два точечных заряда, равных по величине и противоположных по знаку, находящихся друг от друга на некотором расстоянии, очень малом по сравнению с расстоянием до точки наблюдения. Такая система называется **электрический диполь** (рис. 1.2). Выберем на плоскости точку, из которой начнем проводить силовую линию. Согласно принципу суперпозиций найдем направления вектора напряженности $\vec{E}_\Sigma$ поля в этой точке. Проведем в этом направлении отрезок фиксированной длины. Конец отрезка задает вторую точку, в которой также найдем напряженность поля и повторим предыдущую процедуру. Подобным путем дойдем до второго заряда. Получена некоторая ломаная линия. Это еще не силовая линия, поскольку напря-

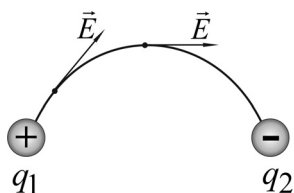


Рис. 1.3

женность поля не совпадает по направлению с касательной к линии в каждой точке. Необходимо уточнить картину поля, для чего уменьшим расстояние между точками, в которых ищем напряженность поля. В пределе получим гладкую кривую, касательная к которой в каждой точке совпадает по направлению с вектором напряженности поля (рис. 1.3).

На рис. 1.4 представлены картины силовых линий поля диполя и поля, созданного двумя положительными точечными зарядами. Иногда на силовых линиях ставятся стрелочки, показывающие направление вектора вдоль кривой.

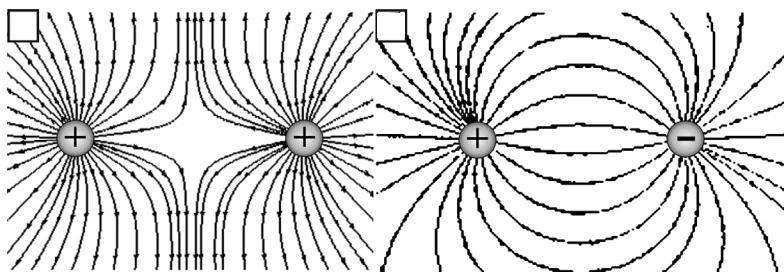


Рис. 1.4

Силовые линии электростатического поля не замкнуты, они начинаются (исходят) на положительно заряженных телах и заканчиваются на отрицательно заряженных телах (либо «уходят» в бесконечность и «приходят» из бесконечности (см. рис. 1.4, центральные линии)). Еще раз отметим, что с помощью силовых линий можно изобразить не

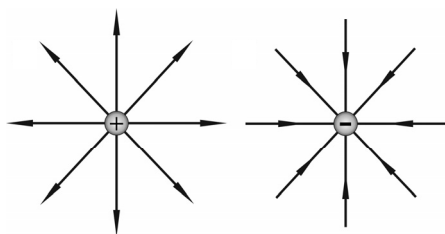


Рис. 1.5

только направление, но и величину напряженности поля. В качестве примера можно рассмотреть поле точечного заряда (рис. 1.5). Поле точечного заряда радиально симметрично, поэтому густота силовых линий, как и напряженность поля, убывает пропорционально квадрату расстояния от заряда.

В качестве простейших приборов для визуализации электростатического поля можно использовать *электростатические султаны*²⁵. Султан представляет собой металлический стержень на диэлектрической подставке, на конце которого ввинчены два металлических диска. Между дисками зажаты бумажные полоски (или шелковые нити). Полоски должны хорошо впитывать влагу из воздуха, для того чтобы на них мог стекать заряд. Если султаны зарядить, то бумажные полоски вытягиваются вдоль силовых линий электрического поля. Стоит отметить, что на бумажки действует сила тяжести, прижимающая их к земле, поэтому картина поля получается слегка искаженной. На рис. 1.6 изображены два одноименно заряженных султана.



Рис. 1.6

Теперь можно перейти к рассмотрению энергетической характеристики электрического поля. Электростатическое поле потенциально, поэтому на основе связи работы консервативных сил с потенциальной энергией работа A_{12} электрических сил по перемещению заряда в поле из точки 1 в точку 2 равна приращению потенциальной энергии ΔE_p этого заряда, взятому с обратным знаком (рис. 1.7):

$$A_{12} = -\Delta E_p = E_{p1} - E_{p2}.$$

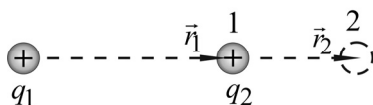


Рис. 1.7

Для простоты рассмотрим работу кулоновских сил по перемещению точечного пробного заряда q_2 в поле точечного заряда q_1 (заряды находятся в вакууме). Работа потенциальных сил, а кулоновские силы являются потенциальными,

зависит от начального и конечного положения тела и не зависит от формы траектории, по которой тело перемещалось между

²⁵ *Султан* – форма, характеризующаяся резким утолщением на одном конце предмета или в виде венчика, хохолка, стоячей кисти (например: украшение на головном уборе в виде вертикально укрепленного перьевого или волосяного пучка; султан на птице – хохолок; крона пальмы имеет форму султана).

этимися положениями. Для определенности оба заряда будут положительными. Тогда для простоты будем рассматривать перемещение заряда q_2 по направлению действия кулоновской силы со стороны заряда q_1 (см. рис. 1.7). Следовательно, **косинус угла между направлением вектора силы и вектора перемещения можно считать равным единице** ($\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$). Тогда работа кулоновских сил по определению равна

$$A_{12} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} F(r) \cos \alpha dr = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{q_1}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_1}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_1}{r_2}.$$

Учитывая связи работы консервативных сил с потенциальной энергией, записанной ранее, получаем следующее выражение:

$$A_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_1}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_1}{r_2} = E_{p1} - E_{p2}.$$

Следовательно, потенциальная энергия заряда q_2 в точке 1 поля заряда q_1 равна

$$E_{p1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_1}{r_1}.$$

К сожалению, потенциальная энергия не может выступать в роли энергетической характеристики электрического поля, поскольку зависит от пробного заряда q_2 .

Поступим так же, как это было сделано, когда вводили понятие напряженности электрического поля – разделим потенциальную энергию E_{p1} на заряд q_2 :

$$\varphi_1 = \frac{E_{p1}}{q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_1}{q_2 r_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1},$$

здесь φ_1 – **потенциал электрического поля** точечного заряда q_1 в точке 1. Таким образом, получена физическая величина, которая не зависит от величины пробного заряда q_2 и характеризует поле заряда q_1

в рассматриваемой точке. **Потенциал электрического поля в какой-либо точке равен отношению потенциальной энергии взаимодействия заряда, поле которого рассматривается с точечным пробным зарядом, помещенным в заданную точку пространства, к величине этого заряда.**

Непосредственный **физический смысл** имеет не сам потенциал, а **разность потенциалов**, которая определяется как отношение работы, совершаемой полем при переносе заряда q из точки 1 в точку 2, к величине этого заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r},$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы поля в точках 1 и 2 соответственно. **Отметим, что все остальные заряды при такой операции должны быть неподвижны.**

В общем случае потенциальная энергия определена с точностью до некоторой постоянной величины, которая зависит от выбора начала отсчета потенциальной энергии заряда q в электростатическом поле. Обычно потенциальную энергию заряда q принимают равной нулю в точке, бесконечно удаленной от всех зарядов системы. Таким образом, потенциал поля на бесконечности также равен нулю. Поэтому потенциал электростатического поля в какой-либо точке можно определить через работу поля следующим образом:

$$\varphi_1 - \varphi_\infty = \varphi_1 - 0 = \varphi_1 = \frac{A_{1 \rightarrow \infty}}{q} = \int_{\vec{r}_1}^{\infty} \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r}.$$

Потенциал поля в точке 1 равен отношению работы электрических сил по переносу положительного точечного пробного заряда из этой точки на бесконечность к величине этого заряда.

На основе записанных формул для напряженности и потенциала электрического поля можно записать выражение, связывающее эти величины:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{E}(\vec{r}) d\vec{r}.$$

В случае *однородного электрического поля*²⁶ можно записать

$$\varphi_1 - \varphi_2 = E \cos \alpha \cdot \Delta r ,$$

где Δr – расстояние между точками с потенциалом φ_1 и φ_2 ; α – угол между направлением вектора напряженности $\vec{E}$ и вектора перемещения $\Delta \vec{r}$.

При наложении электростатических полей их потенциалы складываются алгебраически. Приведем пример для поля точечных зарядов:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} ,$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды. Следует учесть, что все φ_i обращаются в нуль в одной и той же бесконечно удаленной точке [7].

Если заряды системы распределены в пространстве непрерывно, то потенциал их поля в среде с диэлектрической проницаемостью ϵ равен

$$\varphi = \int_{(q)} \frac{dq}{4\pi\epsilon_0\epsilon r} .$$

Электрическое поле можно изображать не только с помощью силовых линий напряженности, но и с помощью *эквипотенциальных поверхностей*. **Эквипотенциальная поверхность** – геометрическое место точек равного потенциала электростатического поля. На рис. 1.8 приведена картина сечения эквипотенциальных линий электро-

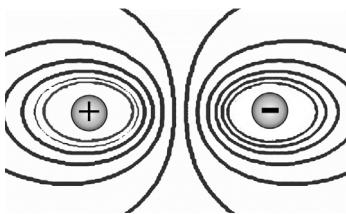


Рис. 1.8

статического поля диполя. **Эквипотенциальные поверхности строят так, чтобы разности потенциалов между двумя соседними поверхностями были одинаковы.**

²⁶ Под *однородным электрическим полем* понимается поле, напряженность которого в каждой точке пространства одинакова по модулю и направлению.

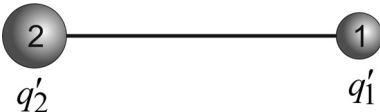
Эквипотенциальные поверхности пересекаются с силовыми линиями напряженности под прямым углом. По картине эквипотенциальных поверхностей можно восстановить силовые линии электрического поля.

Как уже было сказано ранее, **поверхность проводника, по которому не течет ток, т. е. в случае равновесного распределения заряда, также является эквипотенциальной поверхностью.** Данное утверждение справедливо не только для нейтрального проводника, помещенного во внешнее поле, но также для заряженного проводника.

Далее перейдем к задаче взаимодействия заряженных проводящих шаров, упомянутой ранее.

Задача. Рассмотрим два однородных металлических шара. Одному шару сообщили заряд $q_1 = 13$ нКл, другому – заряд $q_2 = 18$ нКл, затем шары соединили проводником. Найти окончательное распределение зарядов на шарах, находящихся далеко друг от друга. Радиус первого шара $R_1 = 8,0$ см, второго $R_2 = 18$ см. *Емкостью*²⁷ соединительного проводника по сравнению с емкостью каждого из шаров можно пренебречь.

Запишем краткое условие задачи.

Дано:	Решение
$q_1 = 13$ нКл	
$q_2 = 18$ нКл	
$R_1 = 8,0$ см	
$R_2 = 18$ см	
$q'_1 = ?$	Поскольку металлические шары однородны и являются проводниками, то заряды распределяются по поверхности каждого шара равномерно.
$q'_2 = ?$	

После того как металлические шары соединили проводником, заряды с одного шара по этому проводнику частично перетекают на другой. Рассмотрим подробнее этот процесс.

Как уже было ранее сказано, одноименные заряды отталкиваются друг от друга. Возникает вопрос: почему заряды с одного положительно

²⁷ Понятие емкости будет рассмотрено ниже.

заряженного шара перетекают на другой положительно заряженный шар? Если напряженность поля в любой точке **внутри проводника** равна нулю, то заряды в проводнике находятся в равновесии. Это легко понять, если вспомнить, что напряженность – это силовая характеристика поля, соответственно, если нет силового воздействия, то нет и перемещения зарядов вдоль проводника.

В нашем случае воздействие результирующего поля на заряды проводников отлично от нуля (напряженность поля отлична от нуля). Электроны будут перетекать по проводнику от первого шара (см. рисунок к задаче) на второй, пока не установится равновесное распределение зарядов. Это произойдет тогда, когда поля шаров уравниваются друг друга, а следовательно, результирующая кулоновская сила, действующая на заряды, станет равной нулю. Ток в проводнике прекратится, а его поверхность станет эквипотенциальной (силовые линии напряженности будут перпендикулярны поверхности проводников). Последнее означает, что заряды будут перетекать с одного шара на другой, пока их потенциалы не выровняются (станут одинаковыми).

Следовательно, после соединения металлических шаров их потенциалы выравниваются:

$$\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi. \quad (1.1)$$

Отметим, что условием прекращения протекания тока между шарами является не выравнивание их зарядов, а именно равенство потенциалов шаров. В качестве гидродинамической аналогии можно привести сообщающиеся сосуды²⁸. Жидкость перетекает из одного сосуда в другой, пока уровни жидкостей в сосудах не выровняются. При этом в конце процесса в сосудах может находиться разное количество жидкости.

Для того чтобы связать потенциалы шаров и их заряды, введем физическую величину, которая называется емкость. **Емкость** уединенного проводника C равна отношению заряда q этого проводника к его потенциалу φ ²⁹:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1.2)$$

²⁸ Без учета капиллярных явлений.

²⁹ Определение справедливо для равновесного распределения зарядов по проводнику (по его поверхности). Предполагается, что в бесконечно удаленной точке от проводника потенциал равен нулю.

На емкость проводника влияет его форма, размер, диэлектрические свойства окружающей среды. Кроме того, на емкость проводника влияет наличие вокруг него других проводников [7, 10, 15].

В нашем случае на основе (1.1) и (1.2) можем записать следующее:

$$q'_1 = C_1 \Phi, \quad q'_2 = C_2 \Phi, \quad (1.3)$$

где C_1 и C_2 – емкости первого и второго шаров соответственно. При этом в силу удаленности шаров друг от друга их взаимным влиянием на значение емкости каждого из них можно пренебречь.

Напомним, что систему шаров рассматриваем относительно некоторой произвольной инерциальной системы отсчета. Из условия задачи следует, что система, состоящая из двух шаров и проводника, **электрически изолирована**, т. е. система не обменивается электрическими зарядами с внешними телами. В таком случае мы можем воспользоваться законом сохранения заряда. Полный заряд системы согласно свойству зарядов равен $q = q_1 + q_2$ и остается таким же после соединения шаров проводником:

$$q = q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2 = (13 + 18)10^{-9} = 31 \text{ (нКл)}. \quad (1.4)$$

Емкость уединенного однородного шара (сферы) в вакууме равна $C = 4\pi\epsilon_0 R$ – где R радиус шара (сферы). С учетом выражений (1.3) и (1.4)

$$\begin{cases} \frac{q'_1}{q'_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{R_1}{R_2}, \\ q = q'_1 + q'_2, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q'_2 = q \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \approx 21 \text{ нКл}, \\ q'_1 = q - q'_2 = 10 \text{ нКл}. \end{cases}$$

Как видим, за счет перетекания электронов будет уменьшаться избыточный положительный заряд на первом шаре и увеличиваться на втором.

Ответ: $q'_1 = 10 \text{ нКл}, \quad q'_2 = 21 \text{ нКл}.$

Как было отмечено, заряды распределяются по поверхности проводника. Посчитаем поверхностную плотность зарядов после соединения шаров проводником:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{q'_1}{S_1}, \\ \sigma_2 = \frac{q'_2}{S_2}, \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{q'_1}{4\pi R_1^2} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ (Кл/м}^2\text{)}, \\ \sigma_2 = \frac{q'_2}{4\pi R_2^2} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ (Кл/м}^2\text{)}. \end{array} \right.$$

Поверхностная плотность заряда в 2,4 раза **больше** на **маленьком** шаре (первый шар), чем на большом (второй шар). Разница тем заметней, чем больше отношение радиусов шаров (R_2/R_1). Этот эффект ярко проявляется в случае наличия у проводника острия или выступа: **заряд стекает на острие или выступ проводника**.

Более подробная теория представлена в соответствующих разделах настоящего пособия и приведена в учебниках из библиографического списка.

Далее рассмотрим некоторые особенности решения задач раздела «Электростатика и законы постоянного тока».

1.2. ОСНОВЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Решение задач необходимо для понимания физических законов и принципов, определения границ применимости принципов и формирования навыков их использования при решении конкретной проблемы. Только понимая суть физических моделей, можно успешно применять их при решении задач. Без владения понятийным аппаратом не стоит приступать к решению даже самых простых задач.

Перед решением задачи необходимо разобрать простые примеры использования тех или иных законов или правил.

В учебном пособии [1] выделены *три основных вопроса*, отвечая на которые, можно решить любую задачу: 1) *что мы знаем?* 2) *что мы хотим узнать?* 3) *что нам для этого необходимо?*

При решении задач, в том числе по разделу «Электростатика и законы постоянного тока», следует соблюдать ряд правил.

1. Для начала внимательно проанализируйте условие задачи, **установите величины, которые требуется определить в задаче**.

2. Сделайте краткую запись условия с помощью общепринятых буквенных обозначений (см. приложение Б, табл. ПБ.4), предварительно выделив основные физические величины, описывающие процесс, начальные и граничные условия, все упрощающие предположения, которые помогут сформулировать физическую модель рассматриваемого процесса.

3. Численные значения физических величин, представленные в задаче, желательно перевести в СИ (см. приложение Б, табл. ПБ.4), что позволит в процессе решения избежать вычислительных ошибок. Однако в ряде случаев можно использовать и внесистемные единицы измерения, если это более удобно. При этом нужно быть очень аккуратным при подстановке таких значений в уравнения, дабы избежать ошибок все величины должны быть приведены к единообразному виду.

4. В задачах по электростатике и электродинамике чаще всего необходимо привести иллюстрацию, поясняющую условие задачи.

5. Для физических явлений, описанных в задаче, запишите физические законы в форме математических уравнений, которые их описывают (см. таблицу приложения Г).

6. Решите полученную систему уравнений относительно искомых физических величин.

7. Сначала следует получить решение в общем виде и только потом, предварительно проверив полученное решение на соответствие размерности, в полученное выражение подставить численные значения.

8. Проводя вычисления, помните, что числовые значения физических величин всегда являются приближенными, и **точность числового ответа не должна превышать точности величин, заданных в условии задачи.**

9. Полученное решение следует проанализировать на выполнение фундаментальных законов (в том числе рассмотреть предельные случаи) и на соответствие «здравому смыслу».

10. Запишите ответ.

Для решения задач по темам «Электростатика» и «Законы постоянного тока» необходимо знать законы сохранения заряда, закон Кулона, принцип суперпозиций; определение понятий напряженности и потенциала, емкости, электрического тока, напряжения, сопротивления, электродвижущей силы; знание законов Ома и закона Джоуля–Ленца. Нужно уметь складывать векторы, строить силовые линии, эквипотен-

циальные поверхности, определять напряженность поля, строить *принципиальные схемы*³⁰. Обычно рассмотрение идет в инерциальных системах отсчета. Следует помнить, что при решении задач по электростатике нужно использовать второй закон Ньютона и прочие законы механики, а также нужно не забывать и другие разделы физики, поскольку все они взаимосвязаны. Внимательно изучите свойства зарядов и особенности описания электрических полей.

Успех в решении задач зависит от вашего опыта. Чем больше вы решете задач, тем лучше будут ваши навыки.

При решении задач необходимо устанавливать общую закономерность рассматриваемых явлений путем анализа и синтеза исходных данных.

Чтобы связать данное явление с одним или несколькими физическими законами, нужно разбить сложное явление на ряд простых.

Помните, что разделы физики взаимодополняют друг друга. Используйте знания, полученные при рассмотрении предшествующих разделов [1, 2] при решении задач электродинамики и электростатики.

³⁰ **Принципиальная электрическая схема** – модель, выполненная в виде графического изображения, служащая для передачи с помощью пиктограмм связей между элементами электрического устройства.

2. ЗАКОН КУЛОНА

В настоящем разделе кратко рассмотрен закон Кулона, даны методические рекомендации по решению задач, приведены примеры решения задач и представлены задачи для самостоятельного решения. Более подробные теоретические сведения можно найти в учебниках [3, 6, 7, 10].

2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Закон Кулона – это закон о взаимодействии точечных электрических зарядов.

Был открыт Кулоном в 1785 году. После проведения большого количества опытов с металлическими шариками Кулон дал следующую формулировку закона.

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Важно отметить, для того чтобы закон был верен, необходимы:

1) **точечность зарядов** – т. е. расстояние между заряженными телами много больше их размеров;

2) **их неподвижность** – иначе уже надо учитывать возникающее магнитное поле движущегося заряда.

Запишем математическую формулировку закона Кулона в известной вам со школы **модульной форме**:

$$F_{12} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r_{12}^2}.$$

Поскольку сила является векторной величиной, запишем закон Кулона в векторном виде:

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12},$$

здесь $\vec{F}_{12}$ – сила, с которой заряд 1 действует на заряд 2; q_1, q_2 – величина зарядов; $\vec{e}_{12} = \vec{r}_{12}/r_{12}$ – единичный вектор, $\vec{r}_{12}$ – радиус-вектор (вектор, направленный от заряда 1 к заряду 2 и равный по модулю расстоянию между зарядами r_{12}); k – коэффициент пропорциональности (иногда используют название постоянная Кулона).

В СИ $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ (или $\text{Ф}^{-1} \cdot \text{м}$) и записывается следующим образом:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$$

где $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – электрическая постоянная.

В **однородном** диэлектрике (**газе** или **жидкости**) закон Кулона записывается следующим образом:

$$F_{12} = \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_{12}^2},$$

где ϵ – **диэлектрическая проницаемость** среды ($\epsilon \geq 1$). Величина ϵ показывает, во сколько раз **уменьшается** сила электростатического взаимодействия между зарядами в данной среде.

Примеры решения задач

Задача 1. Два шарика массой по 0,600 г каждый подвешен на нитях длиной 1,00 м. При сообщении шарикам зарядов они разошлись на 5,00 см. Определить заряд каждого шарика.

Решение. Выполним рисунок (рис. 2.1).

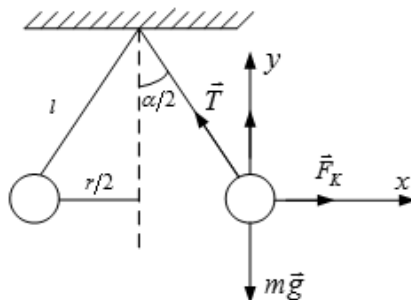


Рис. 2.1

После сообщения шарикам заряда каждый из них отклонился от вертикали на угол альфа и остановился в положении равновесия.

На каждый шарик действуют три силы: сила Кулона $\vec{F}_K$, сила натяжения нити $\vec{T}$ и сила тяжести $m\vec{g}$.

Запишем второй закон Ньютона:

$$\vec{F}_K + \vec{T} + m\vec{g} = 0. \quad (2.1)$$

В проекции на ось x

$$F_K - T \sin \alpha = 0 \Rightarrow \sin \alpha = \frac{F_K}{T}; \quad (2.2)$$

в проекции на ось y

$$T \cos \alpha - mg = 0 \Rightarrow \cos \alpha = \frac{mg}{T}. \quad (2.3)$$

Из формул (2.2) и (2.3) следует, что

$$F_K = mg \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.4)$$

Из рис. 2.1 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{2\sqrt{l^2 - \frac{r^2}{4}}} = \frac{r}{\sqrt{4l^2 - r^2}}. \quad (2.5)$$

Из формул (2.4) и (2.5) получаем

$$F_K = \frac{mgr}{\sqrt{4l^2 - r^2}}. \quad (2.6)$$

Из закона Кулона следует:

$$F_K = k \frac{q^2}{r^2}, \quad (2.7)$$

значит,

$$q = r \sqrt{\frac{F_K}{k}}. \quad (2.8)$$

Тогда из уравнений (2.7) и (2.8) получаем

$$q = r \sqrt{\frac{mgr}{k\sqrt{4l^2 - r^2}}}, \quad (2.9)$$

$$q = 5,00 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{0,600 \cdot 10^{-3} \cdot 9,80 \cdot 5,00 \cdot 10^{-2}}{8,99 \cdot 10^9 \sqrt{4,00(1,00)^2 - (5,00 \cdot 10^{-2})^2}}} = 6,39 \cdot 10^{-9} \text{ (Кл)}.$$

Ответ: $q = 6,39 \cdot 10^{-9}$ Кл.

Задача 2. В воздухе на нити висит шарик объемом $V = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ и плотностью $\rho = 9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Заряд шарика $q = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$. На какое расстояние снизу надо поднести к нему маленький шарик с таким же по модулю, но противоположным по знаку зарядом, чтобы сила натяжения нити возросла вдвое? Рассмотрите два случая: а) шарики взаимодействуют в воздухе; б) вся система погружена в керосин (недостающие данные можно посмотреть в приложении Б, табл. ПБ.5) [16].

Решение. а) В воздухе на первый шарик до поднесения второго действует сила натяжения нити $\vec{T}_1$ и сила тяжести $m\vec{g}$ (рис. 2.2).

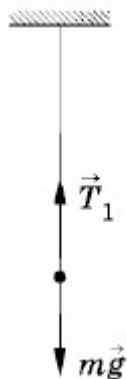


Рис. 2.2

Так как шарик находится в равновесии, то $T_1 = mg$. После того как к первому шарiku поднесли снизу второй заряженный шарик (рис. 2.3), на первый шарик стали действовать три силы: сила натяжения нити $\vec{T}_2$, сила тяжести $m\vec{g}$ и кулоновская сила $\vec{F}_1$.

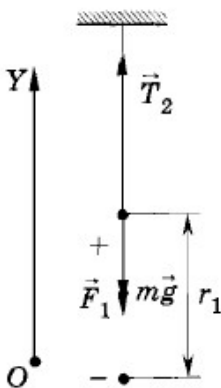


Рис. 2.3

Так как и теперь шарик находится в равновесии, то

$$\vec{T}_2 + m\vec{g} + \vec{F}_1 = 0. \quad (2.10)$$

В проекции на ось Y имеем:

$$T_2 - mg - F_1 = 0. \quad (2.11)$$

Согласно условию $T_2 = 2T_1 = 2mg$. Следовательно,

$$2mg - mg - F_1 = 0. \quad (2.12)$$

Отсюда получаем

$$F_1 = mg. \quad (2.13)$$

Применим закон Кулона в уравнении (2.13):

$$F_1 = k \frac{q^2}{r_1^2} \Rightarrow k \frac{q^2}{r_1^2} = mg. \quad (2.14)$$

Вспоминаем, что $m = \rho V$, получаем:

$$k \frac{q^2}{r_1^2} = \rho V g. \quad (2.15)$$

Отсюда

$$r_1 = |q| \sqrt{\frac{k}{\rho V g}} = 2 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9}{9 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10}} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}.$$

Ответ: $r_1 = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}.$

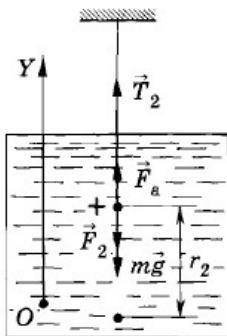


Рис. 2.4

б) Когда вся система погружена в керосин, на первый шарик действуют четыре силы: сила натяжения нити $\vec{T}_2$, сила тяжести $m\vec{g}$, кулоновская сила $\vec{F}_2$ и архимедова сила $\vec{F}_A$ (рис. 2.4).

Из условия равновесия имеем:

$$\vec{T}_2 + m\vec{g} + \vec{F}_2 + \vec{F}_A = 0. \quad (2.16)$$

В проекции на ось Y

$$T_2 - mg - F_2 - F_A = 0. \quad (1.17)$$

Вспоминаем, что $T_2 = 2mg = 2\rho Vg$, $F_2 = k \frac{q^2}{\varepsilon r_2^2}$, $F_A = \rho_K Vg$. Подставляя эти выражения в равенство (2.17), получим

$$r_2 = |q| \sqrt{\frac{k}{\varepsilon Vg(\rho - \rho_K)}} = 2 \cdot 10^{-7} \sqrt{\frac{9 \cdot 10^9}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 10(9 \cdot 10^3 - 800)}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}.$$

Ответ: $r_2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Задача 3. В вершинах квадрата расположены одинаковые заряды q . Какой заряд q_0 надо поместить в центре квадрата, чтобы система находилась в равновесии [16]?

Решение. Искомый заряд q_0 должен притягивать заряды q , расположенные в вершинах квадрата, компенсируя их взаимное отталкивание. Поэтому знаки зарядов q_0 и q противоположны.

При любом значении заряда q_0 он будет находиться в равновесии, так как расположен в центре симметрии квадрата, и силы, действующие на него со стороны зарядов, расположенных в вершинах квадрата, компенсируются.

Заряды, расположенные в вершинах квадрата, будут находиться в равновесии, когда суммы действующих на них сил равны нулю. Рассмотрим, например, условие равновесия заряда, расположенного в точке D (рис. 2.5). На этот заряд действуют силы отталкивания $\vec{F}_1$, $\vec{F}_2$ и $\vec{F}_3$ со стороны зарядов, расположенных в вершинах B , C и K , и сила $\vec{F}_4$ притяжения к заряду q_0 . Следовательно,

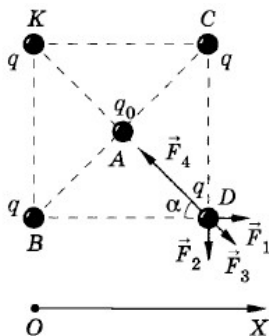


Рис. 2.5

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 = 0. \quad (2.18)$$

В проекциях на ось X это равенство примет вид

$$F_1 + F_3 \cos \alpha - F_4 \cos \alpha = 0, \quad (2.19)$$

где $\alpha = 45^\circ$, а значит, $\cos 45^\circ = \sqrt{2}/2$.

Для нахождения модулей сил необходимо знать расстояния между зарядами. Обозначим длину стороны BD квадрата через a , тогда

$$KD = a\sqrt{2}, \quad AD = \frac{\sqrt{2}}{2}a. \quad (2.20)$$

Подставляя силы в уравнение (2.19), получим

$$k \frac{q^2}{a} + k \frac{q^2}{a\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2}}{2} - k \frac{2qq_0}{a\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2}}{2} = 0. \quad (2.21)$$

Учитывая, что заряды q_0 и q должны иметь противоположные знаки, получим

$$q_0 = -\frac{q(2\sqrt{2} + 1)}{4}.$$

Ответ: $q_0 = -\frac{q(2\sqrt{2} + 1)}{4}.$

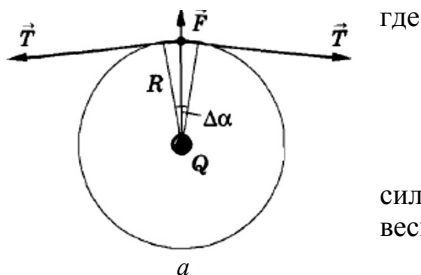
Задача 4. Тонкое проволочное кольцо радиусом D несет электрический заряд q . В центре кольца расположен одноименный с q заряд Q , причем $Q \gg q$. Определите силу, растягивающую кольцо [16].

Решение

1-й способ. Так как $Q \gg q$, то взаимодействием между отдельными элементами кольца можно пренебречь. Выделим малый элемент кольца длиной $\Delta l = R\Delta\alpha$ (рис. 2.6, а).

Со стороны заряда Q на него действует сила

$$F = k \frac{Q\Delta q}{R^2}, \quad (2.22)$$



$$\Delta q = \frac{q}{2\pi R} \Delta l = \frac{q \Delta \alpha}{2\pi}. \quad (2.23)$$

Силы натяжения $\vec{T}$ уравнивают силу $\vec{F}$ (рис. 2.6, б). Из условия равновесия, учитывая, что $\Delta \alpha$ мало, имеем

$$F = 2T \sin \frac{\Delta \alpha}{2} \approx T \Delta \alpha. \quad (2.24)$$

Отсюда получаем

$$T = \frac{F}{\Delta \alpha} = k \frac{Q \Delta q}{R^2 \Delta \alpha}. \quad (2.25)$$

Подставляя в уравнение (2.25) значения $\Delta q = \frac{q \Delta \alpha}{2\pi}$, получим

$$T = k \frac{Qq}{2\pi R^2}.$$

Решение

2-й способ. На каждый элемент кольца длиной Δl_i (рис. 2.7) действует элементарная сила

$$\Delta F_i = k \frac{Q \Delta q_i}{R^2}. \quad (2.26)$$

Так как

$$\Delta q_i = \frac{q \Delta l_i}{2\pi R}, \quad (2.27)$$

то получаем

$$\Delta F_i = k \frac{Qq \Delta l_i}{2\pi R^3}. \quad (2.28)$$

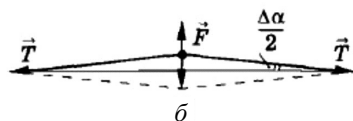


Рис. 2.6

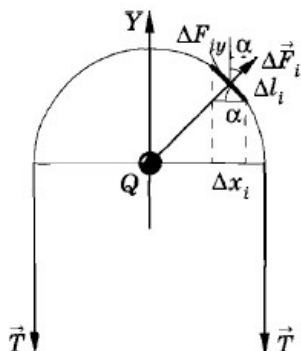


Рис. 2.7

Геометрическая сумма элементарных сил, действующих на полукольцо, уравнивается возникающими силами натяжения кольца (см. рис. 2.7):

$$\sum_i \Delta \vec{F}_i = 2\vec{T} = 0. \quad (2.29)$$

Запишем уравнение в проекции на ось Y :

$$\sum_i \Delta F_i - 2T = 0. \quad (2.30)$$

Отсюда получаем

$$T = \frac{1}{2} \sum_i \Delta F_i. \quad (2.31)$$

Из рис. 2.7 видно, что

$$\Delta F_{iy} = \Delta F_i \cos \alpha = \Delta F_i \frac{\Delta x_i}{\Delta l_i} = k \frac{Qq \Delta x_i}{2\pi R^3}. \quad (2.32)$$

Следовательно,

$$T = \frac{1}{2} \sum_i k \frac{Qq \Delta x_i}{2\pi R^3} = \frac{1}{2} k \frac{Qq}{2\pi R^3} \sum_i \Delta x_i. \quad (2.33)$$

Так как $\sum_i \Delta x_i = 2R$, то

$$T = k \frac{Qq}{2\pi R^2}.$$

Ответ: $T = k \frac{Qq}{2\pi R^2}.$

2.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ЗАКОН КУЛОНА

Решение задачи о точечных зарядах и системах, сводящихся к ним, основано на применении законов механики с учетом закона Кулона и вытекающих из него следствий.

1. Понять предложенную задачу (увидеть физическую модель).
2. Анализ (построить математическую модель явления):
 - а) расставить силы, действующие на точечный заряд, помещенный в электрическое поле, и записать для него уравнение равновесия или основное уравнение динамики материальной точки;
 - б) выразить силы электрического взаимодействия через заряды и поля и подставить эти выражения в исходное уравнение;
 - в) если при взаимодействии заряженных тел между ними происходит перераспределение зарядов, к составленному уравнению добавляют уравнение закона сохранения зарядов;
 - г) записать математически все вспомогательные условия.
3. Решить полученную систему уравнений относительно неизвестной величины.
4. Решение проверить и оценить критически.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

Ниже приведены вопросы для самоконтроля, ответами на которые вы можете проверить, достаточно ли хорошо усвоен вами теоретический материал по разделу «Закон Кулона».

1. Выберите, к какому классу характеристик относится электрический заряд:
 - а) характеристика движения;
 - б) характеристика воздействия;
 - в) характеристика объекта.
2. Перечислите все свойства заряда.
3. Сформулируйте свойство квантованности заряда.
4. Сформулируйте свойство аддитивности заряда.
5. Сформулируйте свойство инвариантности заряда.
6. Напишите закон Кулона для силы взаимодействия двух неподвижных зарядов в вакууме.
7. Напишите закон Кулона для силы взаимодействия двух неподвижных зарядов в однородной жидкой (или газообразной) среде.

8. Чему в СИ равна постоянная Кулона?
9. Что такое электрическая постоянная?
10. Во сколько раз кулоновская сила отталкивания протонов больше их гравитационного притяжения?
11. Почему при описании механического движения не учитываются гигантские электрические силы?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в приложении Б. Основные формулы вынесены в таблицу приложения Г.

Уровень 1

2.1. Определить силу взаимодействия двух точечных зарядов $Q_1 = Q_2 = 1$ Кл, находящихся в вакууме на расстоянии $r = 1$ км друг от друга.

2.2. Заряд электрона $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а его масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг. Во сколько раз сила кулоновского отталкивания двух электронов больше силы их гравитационного притяжения?

2.3. На каком расстоянии друг от друга заряды 3,0 мкКл и 20 нКл взаимодействуют с силой 10 мН?

2.4. С какой силой взаимодействуют между собой два заряда, состоящие из 1 г электронного вещества, находящиеся на расстоянии 100 млн км друг от друга?

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

2.6. Три точечных заряда, попарно помещенные на расстоянии 10 см друг от друга, взаимодействуют с силами 0,05 Н, 0,08 Н и 0,12 Н. Определить величины зарядов.

2.7. Два одинаковых маленьких шарика, обладающих зарядом $q_1 = 6,0$ мкКл и зарядом $q_2 = -12$ мкКл, находятся на расстоянии 60 см друг от друга. Определите силу взаимодействия между ними. Чему будет равен заряд каждого шарика, если их привести в соприкосновение и затем разъединить?

2.8. Два заряда $1,66 \cdot 10^{-9}$ Кл и $3,33 \cdot 10^{-9}$ Кл находятся на расстоянии 20,0 см друг от друга. Где надо поместить третий заряд, чтобы он оказался в равновесии?

2.9. Два одинаковых заряженных металлических шарика притягиваются друг к другу. После того как шарики привели в соприкосновение и развели на расстояние вдвое большее первоначального, сила взаимодействия между ними уменьшилась в 12 раз. Каким был заряд первого шарика, если заряд второго был 1,0 мкКл?

2.10. Сколько электронов содержится в капле воды массой $m = 5 \cdot 10^{-50}$ кг ?

Уровень 2

2.11. В элементарной теории атома водорода принимают, что электрон обращается вокруг ядра по круговой орбите. Определить скорость v электрона, если радиус орбиты $r = 55$ пм, а также частоту n вращения электрона.

2.12. Расстояние между двумя точечными зарядами $Q_1 = 1,0$ мкКл и $Q_2 = -Q_1$ равно 10 см. Определить силу F , действующую на точечный заряд $Q = 0,10$ мкКл, удаленный на $r_1 = 6,0$ см от первого и на $r_2 = 8,0$ см от второго заряда.

2.13. В вершинах правильного шестиугольника со стороной $a = 15$ см расположены точечные заряды $Q, 2Q, 3Q, 4Q, 5Q, 6Q$ ($Q = 0,5$ мкКл). Найти силу F , действующую на точечный заряд Q , лежащий в плоскости шестиугольника и равноудаленный от его вершин.

2.14. Три одинаковых заряда $Q = 1$ нКл каждый расположены по вершинам равностороннего треугольника. Какой отрицательный заряд Q_1 нужно поместить в центре треугольника, чтобы его притяжение уравновесило силы взаимного отталкивания зарядов? Будет ли это равновесие устойчивым?

2.15. Два одинаковых маленьких металлических шарика притягиваются с некоторой силой. Шары привели в соприкосновение и раздвинули на расстояние в $n = 2$ раза большее, чем прежде. При этом модуль силы взаимодействия уменьшился в $m = 5$ раз. Найти величину заряда первого шарика до соприкосновения, если второй имел заряд $q_2 = 1,6$ нКл.

2.16. Два одинаковых шарика, несущих равные заряды, подвешены на нитях равной длины к одной точке. Шары опускают в керосин.

Чему равна плотность ρ материала шариков, если угол расхождения нитей в воздухе и в керосине одинаков? Плотность керосина $\rho_k = 0,8 \text{ г/см}^3$, его диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 2$.

2.17. Шарик массой $m = 2,0 \text{ г}$, заряженный зарядом $q = 10 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$, висит на нити длиной $l = 50 \text{ см}$. В точке закрепления нити находится такой же точечный заряд. Какую минимальную горизонтальную скорость нужно сообщить шарiku, чтобы он сделал полный оборот?

2.18. Внутри гладкой сферы диаметром $d = 50 \text{ см}$ находится маленький шарик, имеющий заряд $q = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$ и массу $m = 10 \text{ г}$. Какой точечный заряд Q надо поместить в нижней точке сферы, чтобы шарик находился в верхней точке сферы в состоянии устойчивого равновесия?

2.19. Заряженный шарик массой 2 г подвешен на нити длиной 1 м и движется по окружности в горизонтальной плоскости. В центре окружности помещен шарик с таким же зарядом. Угол отклонения нити от вертикали равен 30° , угловая скорость вращения равна 1 рад/с . Определите заряд каждого шарика.

2.20. Четыре заряда q, Q, q, Q связаны нитями длиной l каждая. Определите угол α между нитями.

Уровень 3

2.21. Бусинка, имеющая массу m и заряд q , может скользить без трения по вертикальной спице, в нижней части которой закреплен заряд Q . Найти период малых колебаний бусинки.

2.22. Внутри гладкой сферы диаметром $d = 50 \text{ см}$ находится маленький шарик, имеющий заряд $q = 10^{-6} \text{ Кл}$ и массу $m = 10 \text{ г}$. Какой точечный заряд Q надо поместить в нижней точке сферы, чтобы шарик находился в верхней точке сферы в состоянии устойчивого равновесия?

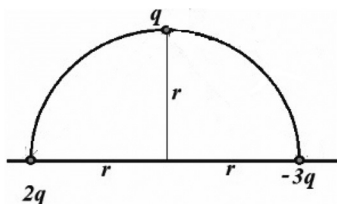


Рис. 2.8

2.23. Три точечных заряда $q = 10 \text{ мкКл}$, $2q$ и $-3q$ расположены на окружности радиусом 30 см так, как показано на рис. 2.8. Найти модуль и направление (угол с горизонтом) результирующей силы, действующей на заряд q со стороны двух других.

2.24. Три шарика соединены между собой одинаковыми резиновыми шнурами так, что получился правильный треугольник. Система лежит на гладком горизонтальном столе. Какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы площадь треугольника увеличилась в четыре раза? Коэффициент жесткости каждого шнура k , начальная длина l .

2.25. По кольцу, расположенному горизонтально, могут свободно перемещаться три шарика. Заряд первого шарика $+q_1$, второго и третьего $+q_2$ каждый. Чему равно отношение зарядов q_1/q_2 , если при равновесии дуга между зарядами $+q_2$ составляет 60° ?

2.26. В непроводящей сфере радиусом 50 см находятся четыре маленьких шарика массой 50 г каждый. Какие по величине одноименные заряды нужно сообщить шарикам, чтобы в положении равновесия они расположились в углах квадрата со стороной R ?

2.27. Два одинаковых шарика массой 0,09 г каждый, заряжены одинаковыми зарядами. Шарiki соединены нитью и подвешены вертикально, как показано на рис. 2.9. Какой заряд должен иметь каждый шарик, чтобы натяжение нитей было одинаковым? Расстояние между центрами шариков 0,3 м. Чему равно натяжение каждой нити?

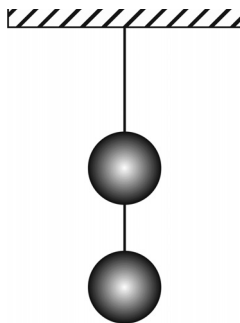


Рис. 2.9

2.28. Шарик массой 4,0 г, несущий заряд $q_1 = 278$ нКл, подвешен на диэлектрической нити. При приближении к нему заряда q_2 противоположного знака нить отклонилась на угол 45° от вертикального направления. Найти модуль заряда q_2 , если расстояние между шарами 6,0 см.

2.29. На шелковых нитях, образующих угол 60° , подвешен заряженный шарик массой 1,0 г. Снизу к нему подносят другой такой же шарик с таким же зарядом, в результате чего натяжение нити уменьшается в два раза. Расстояние между центрами шариков 1,0 см. Определить заряд каждого шарика и натяжение нити в этом случае.

2.30. На гладкую замкнутую непроводящую нить длиной $l = 60$ см нанизаны три бусинки с зарядами $q_1 = 20$ мКл, и $q_2 = \frac{q_1}{4}$, $q_3 = \frac{q_1}{9}$. Система находится в равновесии. Найти силу натяжения нити T . Бусинки могут свободно перемещаться по нити.

3. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Если в пространство, окружающее электрический заряд, внести другой заряд, то на него будет действовать кулоновская сила; значит, в пространстве, окружающем электрические заряды, существует *силовое поле*. **Электрическое поле** – поле, посредством которого взаимодействуют электрические заряды. Поля, которые создаются неподвижными электрическими зарядами, называются **электростатическими**.

Для обнаружения и опытного исследования электростатического поля используется **пробный точечный положительный заряд** – такой заряд, который не искажает исследуемое поле (не вызывает перераспределения зарядов, создающих поле). Если в поле, создаваемое зарядом q , поместить пробный заряд q_0 , то на него действует сила $\vec{F}$, различная в разных точках поля, которая, согласно закону Кулона, пропорциональна пробному заряду q_0 . Поэтому отношение F/q_0 не зависит от q_0 и характеризует электростатическое поле в той точке, где пробный заряд находится. Эта величина называется **напряженностью** и является **силовой характеристикой электростатического поля**.

Напряженность электростатического поля в данной точке есть векторная физическая величина, определяемая силой, действующей на пробный единичный положительный заряд, помещенный в эту точку поля:

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

Напряженность поля точечного заряда в вакууме

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}}{r},$$

или по модулю

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

Направление вектора $\vec{E}$ совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд.

Вектор $\vec{E}$ направлен вдоль радиальной прямой, проходящей через заряд q и данную точку поля A , от заряда, если он положителен, и к заряду, если он отрицателен (рис. 3.1).

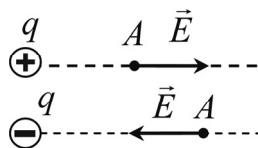


Рис. 3.1

За единицу напряженности электрического поля принимают напряженность такого поля, в котором на заряд в 1 Кл действует сила в 1 Н:

$1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, где В (вольт) – единица потенциала электростатического поля.

Если в данной точке пространства различные заряженные тела создают поля с напряженностями $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots$, то результирующая напряженность поля в этой точке равна

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_k + \dots + \vec{E}_n = \sum_{k=1}^N \vec{E}_k.$$

Это математическая запись **принципа суперпозиции электрических полей**: если электростатическое поле создано не одним, а несколькими зарядами, то напряженность такого поля равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

Непрерывные линии, касательные к которым совпадают с вектором напряженности, называются силовыми линиями **электрического поля**, или **линиями напряженности**.

Силовые линии используют для наглядного изображения электростатических полей.

Свойства силовых линий:

– силовые линии электростатического поля не замкнуты – они начинаются на положительных и заканчиваются на отрицательных зарядах;

– линии непрерывны и нигде не пересекаются (так как их пересечение означало бы отсутствие определенного направления напряженности электрического поля в данной точке);

– густота линий выбирается так, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности площадки, перпендикулярной к линиям, было равно численному значению (модулю) вектора $\vec{E}$.

Так как силовые линии начинаются или оканчиваются на заряженных телах, а затем расходятся, то густота линий больше вблизи заряженных тел. Следовательно, вблизи заряженных тел напряженность поля больше, чем в более удаленных точках.

Общее число силовых линий, пересекающих некоторую поверхность, иначе называют **поток вектора напряженности поля**.

На рис. 3.2 приведены силовые линии точечных положительного и отрицательного заряда и электрического диполя (системы двух зарядов).

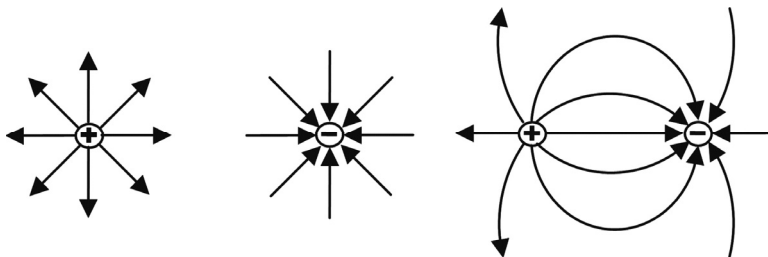


Рис. 3.2

Работа, совершаемая при перемещении заряда в электростатическом поле

Предположим, что некоторый точечный заряд q_0 перемещается в поле неподвижного точечного заряда q из точки 1 в точку 2 (рис. 3.3). На заряд действует сила, и, следовательно, совершается работа. Первоначально определим работу при малом перемещении $d\vec{l}$:

$$dA = \vec{F}d\vec{l},$$

или

$$dA = F_l dl ,$$

где $F_l = F \cos \alpha$ – проекция вектора силы $\vec{F}$ на направление перемещения $d\vec{l}$.

Следовательно, $dA = F dl \cos \alpha$, но $dl \cos \alpha = dr$, где dr равно приращению модуля радиуса-вектора $d\vec{r}$, поэтому $dA = F dr$. Так как заряды точечные, то

$$dA = k \frac{q_0 q}{r^2} dr .$$

Работа, совершаемая при перемещении заряда q_0 из точки 1 в точку 2, определяется выражением

$$A = k q_0 q \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} ,$$

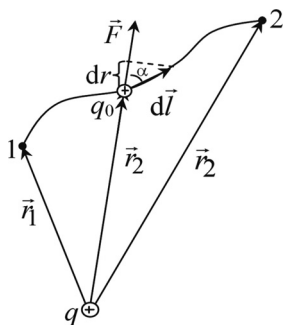


Рис. 3.3

или после интегрирования

$$A = k q_0 q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.1)$$

Следовательно:

– работа не зависит от формы траектории, по которой движется заряд q_0 , зависит от положения начальной 1 и конечной 2 точек перемещения. Силовые поля, удовлетворяющие этому условию, называют **потенциальными**, а силы, действующие в этих полях, называют **консервативными**. Следовательно, электростатическое поле потенциально, а силы в этом поле консервативны;

– работа, совершаемая при перемещении заряда q_0 вдоль замкнутой траектории ($r_1 = r_2$), равна нулю.

Если силовые линии замкнуты, то такое поле называется **вихревым**. К таким полям относятся магнитное поле и возбуждаемое переменным магнитным – электрическое поле.

Энергия заряда в электростатическом поле. Потенциал. Разность потенциалов

Выражение для работы (3.1) можно записать в виде

$$A = k \frac{q_0 q}{r_1} - k \frac{q_0 q}{r_2}.$$

Учитывая, что $k = 1/(4\pi\epsilon_0)$, получаем

$$A = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r_1} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r_2}. \quad (3.2)$$

Известно, что работа связана с потенциальной энергией выражением

$$A = -\Delta W.$$

Систему в данном случае составляют заряд и поле либо можно рассмотреть систему, состоящую из двух зарядов: q_0 и q .

Из выражения (3.2) следует, что

$$W_1 = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r_1},$$

$$W_2 = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r_2},$$

где W_1 – энергия системы в первом состоянии; W_2 – энергия системы во втором состоянии. При произвольном расстоянии между зарядами

$$W = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (3.3)$$

Потенциал φ в какой-либо точке электростатического поля есть физическая величина, определяемая потенциальной энергией единичного положительного заряда, помещенного в эту точку. Потенциал является величиной скалярной и определяется по формуле

$$\varphi = \frac{W}{q_0}. \quad (3.4)$$

В СИ потенциал измеряется в вольтах (В). **За единицу потенциала в 1 В принимается потенциал такой точки поля, в которой заряд в 1 Кл обладает энергией в 1 Дж.**

Из уравнений (3.3) и (3.4) видно, что потенциал поля, создаваемого точечным зарядом q , определяется выражением

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r},$$

где q – заряд, который создает поле; r – расстояние от заряда q до точки, где определяется потенциал.

Предположим, что заряд q_0 находится в точке 1 электростатического поля, потенциал которой равен $\varphi_1 = W_1/q_0$. После его перемещения в точку 2 совершается работа

$$A = W_1 - W_2,$$

где $W_2 = q_0\varphi_2$ – потенциальная энергия системы заряд–поле для точки 2; $\varphi_2 = W_2/q_0$ – потенциал поля в точке 2.

Разность потенциалов между точками 1 и 2:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{W_1}{q_0} - \frac{W_2}{q_0} = \frac{A}{q_0}. \quad (3.5)$$

Из уравнения (3.5) следует, что разность потенциалов между двумя точками электростатического поля определяется отношением работы, совершаемой силами поля при перемещении заряда из одной точки в другую, к величине этого заряда.

Принцип суперпозиции для потенциала:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i,$$

где φ – потенциал результирующего поля, создаваемого системой из N точечных зарядов; φ_i – потенциал поля одного точечного заряда (потенциал поля положительного заряда – положителен, поля отрицательного заряда – отрицателен).

Эквипотенциальные поверхности

Для более наглядного графического изображения полей, кроме линий напряженности, используют поверхности равного потенциала, или эквипотенциальные поверхности. Это поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Если потенциал задан как функция x , y , z , то уравнение эквипотенциальной поверхности имеет вид

$$\varphi(x, y, z) = \text{const}.$$

Линии напряженности поля перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальную поверхность можно провести через любую точку поля. Следовательно, таких поверхностей может быть построено бесконечное множество. Условились, однако, проводить поверхности таким образом, чтобы разность потенциалов для двух соседних поверхностей была бы всюду одна и та же. Тогда по густоте эквипотенциальных поверхностей можно судить о величине напряженности поля.

Чем гуще располагаются эквипотенциальные поверхности, тем быстрее изменяется потенциал при перемещении вдоль нормали к поверхности.

На рис. 3.4, *a* показаны эквипотенциальные поверхности (точнее, их пересечения с плоскостью чертежа) для поля точечного заряда. В соответствии с характером изменения $\vec{E}$ эквипотенциальные поверхности при приближении к заряду становятся гуще. На рис. 3.4, *б* изображены эквипотенциальные поверхности и линии напряженности для поля диполя. Из рис. 3.4 видно, что при одновременном изображении эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности картина поля получается особенно наглядной.

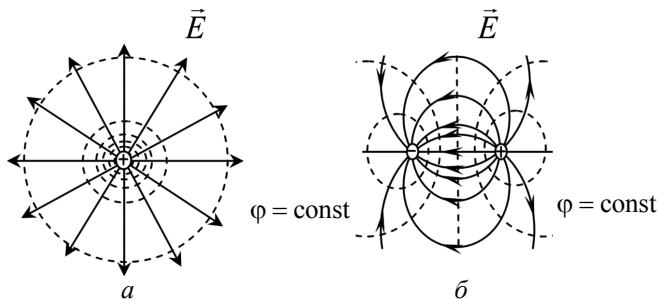


Рис. 3.4

Для однородного поля эквипотенциальные поверхности, очевидно, представляют собой систему равноотстоящих друг от друга плоскостей, перпендикулярных к направлению напряженности поля.

Примеры решения задач

Задача 1. Два точечных заряда $+0,20$ нКл и $-0,30$ нКл находятся в вакууме на расстоянии $0,50$ м друг от друга. Найти напряжённость и потенциал результирующего электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии $0,40$ м от первого заряда и $0,20$ м от второго.

Дано:	СИ	Решение
$q_1 = +0,20$ нКл	$+2,0 \cdot 10^{-10}$ Кл	Так как электрическое поле создано системой двух точечных зарядов, напряжённость и потенциал результирующего электростатического поля рассчитаем по принципу суперпозиции: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ и $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2.$
$q_2 = -0,30$ нКл	$-3,0 \cdot 10^{-10}$ Кл	
$a = 0,50$ м		
$r_1 = 0,40$ м		
$r_2 = 0,20$ м		
$E - ?$		
$\varphi - ?$		

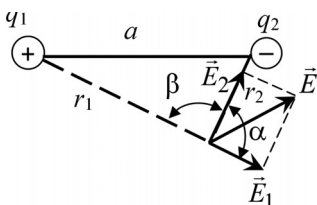


Рис. 3.5

Выполним чертеж с учетом направления векторов $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$.

Учитывая, что напряжённость электростатического поля является векторной величиной, рассчитаем модуль вектора $\vec{E}$ по теореме косинусов (рис. 3.5):

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos \alpha}. \quad (3.6)$$

Угол $\alpha = 180 - \beta$. Согласно тригонометрическим формулам приведения $\cos \alpha = \cos(180 - \beta) = -\cos \beta$. По теореме косинусов

$$\cos \beta = \frac{r_1^2 + r_2^2 - a^2}{2r_1 r_2},$$

тогда

$$\cos \alpha = \frac{a^2 - r_1^2 - r_2^2}{2 r_1 r_2}. \quad (3.7)$$

Вычислим

$$\cos \alpha = \frac{0,50^2 - 0,40^2 - 0,20^2}{2 \cdot 0,40 \cdot 0,20} = 0,312.$$

Модули напряженностей полей, создаваемых точечными зарядами q_1 и q_2 , определяются по формулам

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1|}{r_1^2}; \quad E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_2|}{r_2^2}. \quad (3.8)$$

Потенциалы полей, создаваемых точечными зарядами q_1 и q_2 , в заданной точке определяются по формулам

$$\varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1}; \quad \varphi_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2}. \quad (3.9)$$

С учетом зависимостей (3.6), (3.8) и (3.9) получаем конечные формулы для вычисления величин E и φ :

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sqrt{\left(\frac{q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{q_2}{r_2^2}\right)^2 + 2 \frac{|q_1|}{r_1^2} \frac{|q_2|}{r_2^2} \cos \alpha};$$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r_1} + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r_2}.$$

Вычислим напряженность результирующего поля с учетом того, что $k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ (Н} \cdot \text{м}^2\text{)/Кл}^2$:

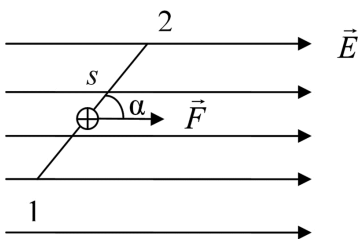
$$E = 9 \cdot 10^9 \sqrt{\left(\frac{2 \cdot 10^{-10}}{0,4^2}\right)^2 + \left(\frac{3 \cdot 10^{-10}}{0,2^2}\right)^2} + 2 \frac{2 \cdot 10^{-10}}{0,4^2} \frac{3 \cdot 10^{-10}}{0,2^2} 0,312 = 82 \text{ (В/м)}.$$

Вычислим потенциал результирующего поля

$$\varphi = 9 \cdot 10^9 \left(\frac{2 \cdot 10^{-10}}{0,4} + \frac{(-3 \cdot 10^{-10})}{0,2} \right) = -9,0 \text{ (В)}.$$

Ответ: $E = 82 \text{ Н/Кл}$; $\varphi = -9,0 \text{ В}$.

Задача 2. В однородном электрическом поле напряженностью 60 кВ/м переместили заряд 5,0 нКл. Перемещение, равное по модулю 20 см, образует угол 60° с направлением силовой линии. Найти работу поля, изменение потенциальной энергии заряда и разность потенциалов между начальной и конечной точками перемещения. Решить задачу для случая перемещения отрицательного заряда.

Дано:	СИ	Решение
$E = 60 \text{ кВ/м}$	$6,0 \cdot 10^4 \text{ В/м}$	Выполним чертеж: 
$q = 5,0 \text{ нКл}$	$5,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$	
$s = 20 \text{ см}$	$0,20 \text{ м}$	
$\alpha = 60^\circ$		
$A - ?$ $\Delta W - ?$ $\varphi_1 - \varphi_2 - ?$		

Работа поля по перемещению заряда

$$A = Fs \cos \alpha ,$$

где $F = qE$ – сила, действующая на заряженную частицу в электрическом поле.

$$A = qEs \cos \alpha ,$$

$$A = 5,0 \cdot 10^{-9} \cdot 6,0 \cdot 10^4 \cdot 0,20 \cdot \cos 60^\circ = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ (Дж)}.$$

Совершаемая электрическим полем работа равна взятому с отрицательным знаком изменению потенциальной энергии заряда:

$$A = -\Delta W \Rightarrow \Delta W = -A .$$

$\Delta W = -30$ кДж – знак «–» означает, что потенциальная энергия заряда уменьшилась. Разность потенциалов связана с напряженностью однородного электрического поля:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed = Es \cos \alpha ,$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = 6,0 \cdot 10^4 \cdot 0,20 \cos 60^\circ = 6,0 \cdot 10^3 \text{ В} = 6,0 \text{ (кВ)}.$$

В случае отрицательного заряда значения A и ΔW изменяют знак на противоположный.

Ответ: $A = 30$ мДж; $\Delta W = -30$ кДж; $\varphi_1 - \varphi_2 = 6,0$ кВ.

3.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ И ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1. Выполнить чертёж, на котором указать направление векторов напряженности электрического поля каждого из зарядов с учетом знака.
2. По принципу суперпозиции построить вектор напряженности результирующего поля.
3. Из рисунка (геометрически) выразить напряженность результирующего поля.

4. По формуле напряженности поля точечного заряда получить выражение для результирующей напряженности.
5. Выполнить вычисления.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что такое пробный заряд? Какими свойствами он должен обладать?
2. Что такое напряженность электростатического поля? Как направлен вектор напряженности?
3. Как определяется напряженность поля точечного заряда?
4. В чем состоит принцип суперпозиции полей?
5. Какая линия называется силовой или линией напряженности? Свойства силовых линий.
6. В чем состоит потенциальность электростатического поля?
7. Что такое потенциал? Как вычислить потенциал поля точечного заряда?
8. Как связаны между собой напряженность и потенциал электростатического поля? (Покажите на примерах).
9. Что такое эквипотенциальная поверхность и какими свойствами она обладает?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в приложении Б. Основные формулы вынесены в таблицу приложения Г.

Уровень 1

3.1. В точке A напряженность поля точечного заряда равна 36 В/м , а в точке B – $9,0 \text{ В/м}$. Определить напряженность поля в точке C , лежащей посередине между точками A и B .

3.2. Какова напряженность поля в точке, лежащей посередине между двумя зарядами $q_1 = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ и $q_2 = 6,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$, находящимися на расстоянии $r = 20 \text{ см}$ в керосине? У керосина $\epsilon_k = 2,0$.

3.3. Какова величина заряда Земли, если напряженность электрического поля у поверхности равна 13 В/см . Землю считать шаром, радиусом $6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$.

3.4. Радиус заряженной металлической сферы равен 10,0 см, ее потенциал 300 В. Определить, с какой плотностью распределен заряд по поверхности сферы.

3.5. Расстояние между двумя точечными зарядами $q_1 = 4,0 \cdot 10^{-8}$ Кл и $q_2 = 6,0 \cdot 10^{-8}$ Кл равно 50 см. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке, расположенной между зарядами на расстоянии 20 см от первого заряда.

3.6. Определить напряженность и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии 10 см от поверхности металлического шара радиусом 1,0 см, если шару сообщен заряд, равный $0,50 \cdot 10^{-7}$ Кл.

3.7. Шарик, заряженный до потенциала $\varphi = 792$ В имеет поверхностную плотность заряда $\sigma = 330$ нКл / м². Найти радиус шарика.

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

3.9. 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.

3.10. Металлический шарик диаметром $d = 2,00$ см заряжен отрицательно до потенциала $\varphi = 150$ В. Сколько избыточных электронов N находится на поверхности шарика?

Уровень 2

3.11. На точечный заряд $q = 5,0 \cdot 10^{-9}$ Кл, помещенный в данную точку поля, действует сила $F = 2,0$ мН. Определить напряженность и потенциал электрического поля в этой точке. Найти величину заряда, создающего поле, если точка находится на расстоянии $r = 10$ см от этого заряда.

3.12. Расстояние между двумя положительными точечными зарядами $q_1 = 9q$ и $q_2 = q$ равно $d = 8$ см. На каком расстоянии r от первого заряда находится точка, в которой напряженность поля зарядов равна нулю? Где находилась бы эта точка, если бы второй заряд был отрицательным?

3.13. В вершинах квадрата со стороной 100 мм расположены равные одноименные заряды. Потенциал создаваемого ими поля в центре квадрата равен 500 В. Определить величину заряда.

3.14. На расстоянии 8 см друг от друга в воздухе находятся два заряда по 1 нКл. Определить напряженность и потенциал поля в точке, находящейся на расстоянии 5 см от зарядов.

3.15. Поле создано двумя точечными зарядами $+2q$ и $-q$, находящимися на расстоянии $d = 12$ см друг от друга. Определить геометрическое место точек на прямой, в которых напряженность E и потенциал φ результирующего поля равны нулю.

3.16. Три одинаковых точечных заряда $q = 5,0$ нКл находятся в вершинах квадрата со стороной $a = 40$ см. Определить напряженность и потенциал электрического поля, создаваемого этими зарядами в четвертой вершине квадрата.

3.17. Шар, радиус которого равен 1 см и заряд $2 \cdot 10^{-5}$ Кл, поместили в масло. Плотность материала шара 2 г/см^3 , плотность масла $0,8 \text{ г/см}^3$. Чтобы шар плавал в масле, его поместили в электрическое поле, направленное вертикально вверх. Какова напряженность электрического поля?

3.18. 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.

3.19. Сплошная металлическая сфера радиусом 20 см равномерно заряжена с поверхностной плотностью заряда, равной $1,0 \text{ нКл/м}^2$. Определить напряженность и потенциал электростатического поля в точках: а) на расстоянии 16 см от центра сферы; б) на поверхности сферы; в) на расстоянии 36 см от центра сферы. Построить графики $E = E(r)$ и $\varphi = \varphi(r)$.

3.20. Определить потенциал φ , до которого можно зарядить единственный металлический шар радиусом $R = 10$ см, если напряженность поля, при которой происходит пробой воздуха, равна $E = 3,0 \text{ МВ/м}$. Найти также максимальную поверхностную плотность σ заряда шара перед пробоем.

Уровень 3

3.21. Три одинаковых капли ртути, заряженных до потенциала $\varphi = 20 \text{ В}$, сливаются в одну. Каков потенциал образовавшейся капли?

3.22. Ртутный шарик, потенциал которого 1,2 кВ, разбивается на 27 одинаковых капелек. Определите потенциал каждой капельки.

3.23. Точечные заряды $q_1 = 1,0$ мкКл и $q_2 = -1,0$ мкКл находятся на расстоянии $d = 10$ см друг от друга. Определить напряженность поля в точке, удаленной на $r_1 = 6,0$ см от первого и $r_2 = 8,0$ см от второго заряда. Определить также силу, действующую в этой точке на точечный заряд $q = 0,10$ мкКл.

3.24. Положительно заряженный шарик массой $m = 0,180$ г и плотностью $\rho_1 = 1,28 \cdot 10^4$ кг/м³ находится во взвешенном состоянии в жидком диэлектрике плотностью $\rho_2 = 900$ кг/м³. В диэлектрике создано однородное электрическое поле напряженностью $E = 45,0$ кВ/м, направленное вертикально вверх. Определить заряд шарика.

3.25. В вершинах квадрата со стороной 500 мм расположены заряды одинаковой величины. В случае, когда два соседних заряда положительны, а два других – отрицательные, напряженность поля в центре квадрата равна 144 В/м. Определить величину заряда.

3.26. В вершинах квадрата со стороной 0,1 м помещены заряды по 0,1 нКл. Определить напряженность и потенциал поля в центре квадрата, если один из зарядов отличается по знаку от остальных.

3.27. Три отрицательных точечных заряда по 2,0 нКл каждый расположены в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника. Определите напряженность поля в точке, расположенной посередине гипотенузы длиной 10 см.

3.28. В вершинах квадрата со стороной 5 см находятся одинаковые положительные заряды $q = 2$ нКл. Определить напряженность и потенциал электростатического поля: 1) в центре квадрата; 2) в середине одной из сторон квадрата.

3.29. Три одинаковых точечных заряда $q = 1,0 \cdot 10^{-9}$ Кл находятся в вершинах прямоугольного треугольника с катетами $a = 40$ см и $b = 60$ см. Определить напряженность и потенциал электрического поля в точке пересечения гипотенузы с перпендикуляром, опущенным из вершины прямого угла.

3.30. Каким будет потенциал шара радиусом 3 см, если: а) сообщить ему заряд 1 нКл; б) окружить его концентрическим шаром радиусом 4 см и заземленным?

4. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ

4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Емкость уединенного проводника (C) – физическая величина, равная отношению сообщенного проводнику заряда к возникающему в результате этого потенциалу:

$$C = \frac{q}{\Phi}, [C] = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф},$$

где q – заряд; Φ – потенциал проводника.

Емкость является свойством проводника и характеризует его способность накапливать электрические заряды.

Емкость сферического проводника:

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R,$$

где ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 – электрическая постоянная; R – радиус сферы.

Емкость зависит:

- от формы проводника;
- размеров проводника;
- диэлектрической проницаемости среды;
- наличия вблизи заряженных тел.

Конденсатор – система из двух разноименно заряженных проводников, **заряды которых равны по модулю**, разделенных диэлектриком таким образом, чтобы все электрическое поле было сосредоточено между проводниками, называемыми **обкладками**. Конденсатор предназначен для накопления электрических зарядов и электрической энергии.

Накопление зарядов на обкладках называется **зарядкой** конденсатора. Нейтрализация зарядов конденсатора при соединении его обкладок проводником называется **разрядкой**.

Емкость конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

где q – модуль заряда обкладки конденсатора; $(\varphi_1 - \varphi_2)$ – разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Классификация конденсаторов:

- в зависимости от формы – плоские, сферические, цилиндрические;
- в зависимости от конструкции – постоянной и переменной емкости;
- в зависимости от диэлектрической проницаемости вещества между обкладками – воздушные, электролитические, керамические, слюдяные, бумаго-масляные и т. д.

Емкость плоского конденсатора:

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

где S – площадь обкладки; d – величина зазора между обкладками.

Емкость сферического конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1},$$

где R_1 и R_2 – радиусы сферических обкладок.

Для увеличения емкости конденсаторы соединяют в батареи. В батареях обкладки конденсаторов могут соединяться последовательно и параллельно.

Последовательным называется включение конденсаторов, когда соединяются разноименно заряженные обкладки: отрицательно заряженная обкладка соединяется с положительно заряженной.

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 4.1) в батарею:

- заряд q остается постоянным на всех конденсаторах:
 $q_0 = q_1 = q_2 = \dots = q_n$;

- $U_6 = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i$;
- $\frac{1}{C_6} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$.

Здесь $U_i = (\varphi_1 - \varphi_2)_i$ – разность потенциалов между обкладками i -го конденсатора.

Из выше записанной формулы видно, что емкость батареи, составленной из n соединенных последовательно конденсаторов равной емкости, в n раз **меньше** емкости одного конденсатора:

$$C_6 = \frac{C}{n}.$$

При параллельном соединении конденсаторов в батарею, положительно заряженные обкладки объединяются в одну группу, отрицательно заряженные – в другую.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 4.2):

• $U_6 = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ – все конденсаторы имеют одну и ту же разность потенциалов между обкладками;

- $q_6 = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i =$
 $= U_6 (C_1 + C_2 + \dots + C_n);$

- $C_6 = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i$.

Из записанной выше формулы видно, что емкость батареи, составленной из n соединенных параллельно конденсаторов равной емкости, в n раз **больше** емкости одного конденсатора:

$$C_6 = nC.$$

Потенциальная энергия электрического поля. Если проводник не находится во внешнем электростатическом поле, то его энергия (потенциальная) W вычисляется по формуле

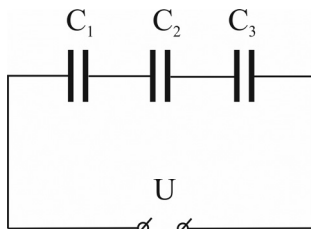


Рис. 4.1

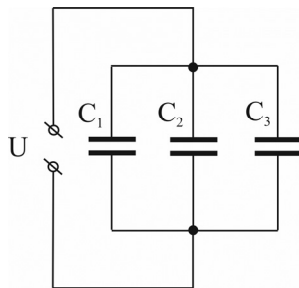


Рис. 4.2

$$W = \frac{q\varphi}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{C\varphi^2}{2},$$

где C – емкость проводника; q и φ – заряд и потенциал.

Полная электрическая (потенциальная) энергия системы, состоящей из N заряженных **точечных** проводников:

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

где q_i – заряд i -го проводника; φ_i – потенциал, созданный всеми зарядами кроме q_i , в точке, где находится i -й проводник.

Энергия заряженного конденсатора равна

$$W = \frac{q(\varphi_1 - \varphi_2)}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

Энергия однородного электрического поля, сосредоточенного в объеме V изотропной среды:

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

$$w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} - \text{объемная плотность энергии.}$$

Сила притяжения пластин плоского конденсатора для случая, когда между пластинами вакуум:

$$F = \frac{\varepsilon_0 E^2 S}{2} = \frac{\varepsilon_0 U^2 S}{2d^2} = \frac{\sigma^2 S}{2\varepsilon_0}.$$

Примеры решения задач

Задача 1. Металлический шар радиусом 5,00 см заряжен до потенциала 150 В. Найти потенциал поля в точке А, удаленной от поверхности шара на расстояние 10,0 см.

Дано:

$$R = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\varphi_{\text{ш}} = 150 \text{ В}$$

$$d = 10,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$\varphi - ?$

Решение

Потенциал поля равномерно заряженного шара в точке А вне его объема равен

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}, \quad (4.1)$$

где q – заряд шара; $r = R + d$ – расстояние от центра шара до точки А.

Емкость шара

$$C = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R. \quad (4.2)$$

С учетом формулы (4.2)

$$q = 2\pi\epsilon\epsilon_0 R\varphi_{\text{ш}}. \quad (4.3)$$

Подставляя выражение (4.3) в (4.1), находим:

$$\varphi = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 R\varphi_{\text{ш}}}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{R}{r} \varphi_{\text{ш}} = \frac{R}{R + d} \varphi_{\text{ш}};$$

$$\varphi = \frac{5,00 \cdot 10^{-2}}{5,00 \cdot 10^{-2} + 0,100} 150 = 50,0 \text{ (В)}.$$

Ответ: $\varphi = 50,0 \text{ В}$.

Задача 2. Два шара, радиусы которых 5,00 и 8,00 см, а потенциалы соответственно 120 и 50,0 В, соединяют проводом. Найти потенциалы шаров после их соединения и заряд, перешедший с одного шара на другой.

Дано:	Решение
$R_1 = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $R_2 = 8,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ $\varphi_1 = 120 \text{ В}$ $\varphi_2 = 50,0 \text{ В}$	Зная радиусы шаров, запишем выражения для их емкостей: $C_1 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \text{ и } C_2 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2.$ Тогда заряды каждого шара до их соединения соответственно равны: $q_1 = C_1 \varphi_1 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \varphi_1,$ $q_2 = C_2 \varphi_2 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2 \varphi_2.$ (4.4)
$\varphi - ?$ $\Delta q - ?$	

Общий заряд шаров до их соединения:

$$q_1 + q_2 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \varphi_1 + 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2 \varphi_2 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 (R_1 \varphi_1 + R_2 \varphi_2). \quad (4.5)$$

После соединения шаров между ними произойдет перераспределение зарядов: часть заряда с шара с большим потенциалом перейдет на шар с меньшим потенциалом, в результате чего потенциалы шаров станут одинаковыми и равными φ . Следовательно, после соединения шаров выражения (4.4) и (4.5) примут вид

$$q'_1 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \varphi, q'_2 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2 \varphi,$$

$$q'_1 + q'_2 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \varphi + 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_2 \varphi = 4\pi\epsilon\epsilon_0 (R_1 + R_2) \varphi. \quad (4.6)$$

Однако при соединении шаров их общий заряд не изменится, следовательно, $q_1 + q_2 = q'_1 + q'_2$, или с учетом формул (4.5) и (4.6):

$$4\pi\epsilon\epsilon_0 (R_1 \varphi_1 + R_2 \varphi_2) = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \varphi (R_1 + R_2),$$

откуда

$$\varphi = \frac{\varphi_1 R_1 + \varphi_2 R_2}{R_1 + R_2}; \quad \varphi = \frac{120 \cdot 5,00 \cdot 10^{-2} + 50,0 \cdot 8,00 \cdot 10^{-2}}{5,00 \cdot 10^{-2} + 8,00 \cdot 10^{-2}} = 76,9 \text{ (В)}.$$

Зная φ , находим заряд, перешедший с одного шара на другой:

$$\Delta q = q_1 - q'_1 = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \varphi_1 - 4\pi\epsilon\epsilon_0 R_1 \varphi,$$

$$\Delta q = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,87 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 5,00 \cdot 10^{-2} (120 - 76,9) = 2,40 \cdot 10^{-10} \text{ (Кл)}.$$

Ответ: $\varphi = 76,9 \text{ В}$; $\Delta q = 2,40 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$.

Задача 3. Пластины плоского конденсатора изолированы друг от друга слоем диэлектрика. Конденсатор заряжен до разности потенциалов 1кВ и отключен от источника напряжения. Определить диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если при его удалении разность потенциалов между пластинами конденсатора возрастает до 3 кВ.

Дано:	Решение
$U_1 = 10^3 \text{ В}$	Поскольку конденсатор отключен от источника напряжения, то его заряд в обоих случаях будет одинаков: $q_1 = q_2$. Принимая во внимание, что $q_1 = U_1 C_1$ и $q_2 = U_2 C_2$, находим $U_1 C_1 = U_2 C_2$, откуда $U_2 / U_1 = C_1 / C_2$.
$U_2 = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$	
$\epsilon_1 - ?$	Учитывая, что для плоского конденсатора $C_1 = \epsilon_1 \epsilon_0 S / d$ и $C_2 = \epsilon_2 \epsilon_0 S / d$, получаем: $C_1 / C_2 = \epsilon_1 / \epsilon_2$, откуда:
	$\epsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \epsilon_2; \epsilon_1 = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 1}{10^3} = 3.$

Ответ: $\epsilon_1 = 3$.

Задача 4. Металлический шар радиусом 3 см имеет заряд $2 \cdot 10^{-8}$ Кл. Шар погружен в керосин так, что не касается стенок сосуда. Определить объемную плотность энергии в точках, отстоящих от центра шара на расстояние 2 и 4 см.

Дано:	Решение
$R = 0,03 \text{ м}$ $r_1 = 0,02 \text{ м}$ $r_2 = 0,04 \text{ м}$ $q = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ $\varepsilon = 2$	По определению объемная плотность энергии $w = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}.$ Точка, находящаяся на расстоянии r_1 от центра заряженного шара, расположена внутри шара, где напряженность E_1 поля равна нулю, поэтому в этой точке $w_1 = 0$. Для точки, отстоящей от центра шара на расстояние r_2, объемная плотность энергии $w_2 = \varepsilon \varepsilon_0 E_2^2 / 2$, где E_2 – напряженность поля в этой точке.
$w_1 - ?$ $w_2 - ?$	

Так как $E_2 = q / (4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2^2)$, то

$$w_2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} \left(\frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_2^2} \right)^2 = \frac{q^2}{32\pi^2 \varepsilon \varepsilon_0 r_2^4};$$

$$w_2 = \frac{(2 \cdot 10^{-8})^2}{32 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot (4 \cdot 10^{-2})^4} = 0,03 \text{ (Дж/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $w_1 = 0, w_2 = 0,03 \text{ Дж/м}^3$.

4.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО РАЗДЕЛУ «ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ»

1. Для нахождения общей емкости в задачах, где рассматривается система заряженных тел (обычно плоских конденсаторов), сначала установить, какие из конденсаторов соединены между собой последовательно, а какие параллельно.

2. Помнить, что если плоский конденсатор подключен к источнику питания, то при раздвижении (сближении) или смещении пластин, вне-

сении (удалении) диэлектрика напряжение между его обкладками остается неизменным. Величины q , C , E , A при этом могут меняться. Если конденсатор после зарядки отключили от источника питания, то при всех указанных выше изменениях, заряд на конденсаторе не меняется.

3. Помнить, что заряд скапливается на поверхности, а внутри проводника поле равно нулю.

Проверить размерность и выполнить расчёт.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называют разностью потенциалов?
2. Что называют электроемкостью?
3. Напишите формулу для расчета электроемкости шара.
4. Напишите формулу для расчета электроемкости плоского конденсатора.
5. Чему равна емкость батареи при последовательном соединении конденсаторов?
6. Чему равна емкость батареи при параллельном соединении конденсаторов?
7. Напишите формулы для расчета энергии заряженного конденсатора.
8. Чему равна объемная плотность энергии электростатического поля?
9. Назовите единицы заряда, потенциала, емкости.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в приложении Б. Основные формулы вынесены в таблицу приложения Г.

Для решения некоторых задач третьего уровня вам потребуются знания таких понятий, как ЭДС и работа источника тока. Указанные понятия рассмотрены в разделе 5 настоящего пособия. Поэтому, прежде чем приступить к решению задач третьего уровня, рассмотрите теоретическую справку, приведенную в 5-м разделе.

Уровень 1

4.1. Конденсатор с парафиновым диэлектриком заряжен до разности потенциалов 150 В. Напряженность поля в нем $6,00 \cdot 10^6$ В/м. Площадь пластин $6,00 \text{ см}^2$. Определить емкость конденсатора ($\epsilon = 2$).

4.2. Вычислить емкость батареи, состоящей из трех конденсаторов емкостью 1 мкФ каждый, при всех возможных случаях их соединения.

4.3. Заряд на каждом из двух последовательно заряженных конденсаторов емкостью 18 и 10 пФ равен 9,0 нКл. Определить напряжение на батарее конденсаторов; на каждом конденсаторе.

4.4. Конденсатор емкостью 16 мкФ последовательно соединен с конденсатором неизвестной емкости. Оба конденсатора подключены к источнику постоянного напряжения 12 В. Определить емкость второго конденсатора, если заряд батареи 24 мкКл.

4.5. Два конденсатора емкостью по 3,00 мкФ заряжены: один до напряжения 100 В, а другой до 200 В. Определить напряжение между обкладками конденсатора, если они соединены параллельно одноименно заряженными обкладками; разноименно заряженными обкладками.

4.6. Плоский воздушный конденсатор заряжен до разности потенциалов 300 В. Площадь пластин $10,0 \text{ см}^2$, напряженность поля в зазоре между ними 300 кВ/м. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах, емкость и энергию конденсатора.

4.7. Найти объемную плотность энергии электрического поля, создаваемого заряженной металлической сферой радиусом 5 см на расстоянии 5 см от ее поверхности, если поверхностная плотность заряда на ней $2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$.

4.8. Площадь пластин плоского слюдяного конденсатора $1,1 \text{ см}^2$, зазор между ними 3,0 мм. При разряде конденсатора выделилась энергия 1,0 мкДж. До какой разности потенциалов был заряжен конденсатор?

4.9. Энергия плоского воздушного конденсатора 0,40 нДж, разность потенциалов на обкладках 60 В, площадь пластин $1,0 \text{ см}^2$. Определить расстояние между обкладками, напряженность и объемную плотность энергии поля конденсатора.

4.10. Во сколько раз изменится емкость проводящего шара радиусом R , если он сначала помещен в среде с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = 2$ (керосин), а затем в среде, диэлектрическая проницаемость которой $\epsilon_2 = 56,2$ (глицерин)?

Уровень 2

4.11. Батарею из двух конденсаторов емкостью 400 и 500 пФ соединили последовательно и включили в сеть напряжением 220 В. Затем батарею отключили от сети, конденсаторы разъединили и соеди-

нили параллельно одноименно заряженными пластинами. Каким будет напряжение на зажимах полученной батареи?

4.12. Расстояние между обкладками плоского воздушного конденсатора 4 мм. На помещенный между обкладками конденсатора заряд $Q = 4,9$ нКл действует сила $F = 98$ мкН. Площадь обкладки 100 см^2 . Определить напряженность поля и разность потенциалов между обкладками, энергию поля конденсатора.

4.13. Заряд конденсатора $1,00$ мкКл, площадь пластин 100 см^2 , зазор между пластинами заполнен слюдой. Определить объемную плотность энергии поля конденсатора и силу притяжения пластин.

4.14. Электрическая схема, состоящая из двух последовательно соединенных конденсаторов, емкостью $1,00$ и $3,00$ мкФ, присоединена к источнику постоянного напряжения 220 В. Определить напряжение на каждом конденсаторе.

4.15. На два конденсатора емкостью $1,00$ и $2,00$ мкФ, соединенных последовательно, подано напряжение 900 В. Возможна ли работа схемы при указанных условиях, если напряжение пробоя конденсаторов 500 В?

4.16. Два плоских конденсатора, имеющих емкость по 10 пФ каждый, соединены в батарее последовательно. На сколько изменится емкость батареи, если пространство между пластинами одного из конденсаторов заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$?

4.17. Найти емкость шарового проводника радиуса 100 мм, окруженного прилегающим к нему концентрическим слоем однородного диэлектрика с проницаемостью $\varepsilon = 6$ и наружным радиусом 200 мм.

Уровень 3

4.18. Найти, как изменятся электроемкость и энергия плоского воздушного конденсатора, если параллельно его обкладкам ввести металлическую пластину толщиной $1,00$ мм. Площадь обкладки конденсатора и пластины 150 см^2 , расстояние между обкладками $6,00$ мм. Конденсатор заряжен до 400 В и отключен от батареи.

4.19. К одной из обкладок плоского конденсатора прилегает стеклянная плоскопараллельная пластинка ($\varepsilon_1 = 7$) толщиной $9,00$ мм. После того как конденсатор отключили от источника напряжением 220 В и вынули стеклянную пластину, между обкладками установилась раз-

ность потенциалов 976 В. Определить расстояние между обкладками и отношение конечной и начальной энергии конденсатора.

4.20. Расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора, присоединенного к источнику напряжения с ЭДС 180 В, увеличивают от 5,00 до 12,0 мм. Площадь пластин конденсатора 175 см². Найти работу по раздвижению пластин в двух случаях: 1) конденсатор перед раздвижением пластин отключен от источника; 2) конденсатор в процессе раздвижения пластин все время соединен с источником.

4.21. В заряженном плоском конденсаторе, отсоединенном от источника, напряженность электростатического поля равна E_0 . Половину пространства между пластинами конденсатора заполнили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ (толщина диэлектрика равна расстоянию между пластинами). Чему стала равна напряженность E электрического поля в пространстве между пластинами, свободном от диэлектрика?

4.22. Два проводящих шара, радиусы которых 10 см и 5,0 см, заряженные до потенциалов 20 и 10 В соответственно, соединяются тонким проводником. Найти поверхностные плотности электрических зарядов шаров после их соединения. Расстояние между шарами велико по сравнению с их радиусами.

4.23. Определить величину заряда, который нужно сообщить двум параллельно соединенным конденсаторам, чтобы зарядить их до разности потенциалов 20 кВ, если емкости конденсаторов соответственно 2,0 и 1,0 мкФ.

4.24. Конденсатору с емкостью 2 мкФ сообщен заряд 10^{-3} Кл. Обкладки конденсатора соединили проводником. Найти количество теплоты, выделенной в проводнике при разрядке конденсатора, и разность потенциалов между обкладками конденсатора до разрядки.

4.25. При разрядке батареи, состоящей из 20 параллельно включенных одинаковых конденсаторов, выделилось 10 Дж тепла. Емкость каждого конденсатора 4,0 мкФ. Определить, до какой разности потенциалов были заряжены конденсаторы.

4.26. Определить, какое количество теплоты выделится при заземлении заряженного до потенциала 3 кВ шара радиусом 5 см.

4.27. Определить количество электрической энергии, перешедшей в тепло при соединении конденсаторов емкостью 2,0 и 0,50 мкФ, заряженных до напряжения 100 и 50 В соответственно одноименно заряженными обкладками.

5. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

5.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Электрический ток – это упорядоченное (направленное) движение свободных электрических зарядов: в металле – электронов, в жидкостях – ионов, в газах – электронов и ионов.

Условия возникновения постоянного электрического тока в проводнике: а) наличие свободных носителей заряда; б) наличие электрического поля внутри проводника, которое создано и поддерживается постоянной разностью потенциалов, приложенной к проводнику.

На тепловое хаотическое движение свободных носителей заряда накладывается упорядоченное (направленное или дрейфовое) движение носителей с некоторой постоянной средней скоростью v в электрическом поле. Носители заряда двигаются в поле из области с большей потенциальной энергией в область с меньшей³¹.

Основные характеристики и универсальные законы постоянного электрического тока рассмотрены на примере металлов, носителями тока в которых являются свободные электроны (классическая теория электропроводности).

Сила тока – скалярная величина, равная отношению заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность за малый промежуток времени, к длительности этого промежутка [7]:

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

³¹ В случае, если в рассматриваемой области нет источника сторонних сил.

Сила тока равна первой производной от заряда по времени:

$$[I] = \frac{[q]}{[t]} = \frac{\text{Кл}}{\text{с}} = \text{А}.$$

Единица измерения силы тока – ампер (А).

Если сила тока и его направление не изменяются с течением времени, то ток называют постоянным. Тогда можно записать:

$$I = \frac{q}{t},$$

где q – заряд, переносимый через рассматриваемую поверхность S за конечный промежуток времени.

За направление тока исторически условно принимают движение положительных зарядов. Направление движения отрицательных зарядов противоположно направлению движения положительных зарядов.

Линии, вдоль которых направленно движутся положительно заряженные частицы в электрическом поле, называют *линиями тока*.

Плотность тока – это векторная физическая величина, **модуль** которой равен отношению силы тока, проходящего через единицу поверхности, **перпендикулярной** к линиям тока (рис. 5.1), к площади этой поверхности:

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S_{\perp}},$$

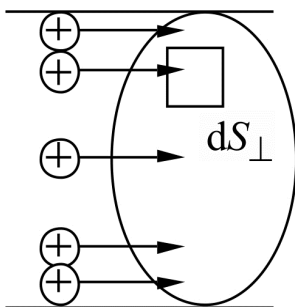


Рис. 5.1

где ΔI – сила тока, проходящего через площадку $\Delta S_{\perp}$.

Связь плотности тока и скорости упорядоченного движения зарядов.

За время Δt (рис. 5.2) через площадку ΔS пройдут направленно заряды, отстоящие от нее не дальше чем на $v\Delta t$, где v – скорость направленного движения носителей заряда, или, как ранее отмечалось, средняя скорость движения (дрейфа) заряда в электрическом поле.

Заряд Δq , прошедший за Δt через ΔS :

$$\Delta q = en\Delta Sv\Delta t,$$

где e – элементарный заряд (модуль заряда электрона) одного носителя тока; n – концентрация носителей в проводнике; $\Delta Sv\Delta t$ – объем проводника, из которого за время Δt все содержащиеся в нем свободные электроны выйдут и пересекут поперечное сечение ΔS . Следует заметить, что при прохождении тока в проводнике выполняется условие стационарности, т. е. сколько носителей заряда ушло из некоторого объема проводника, столько и пришло.

Таким образом, сила тока

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = en\Delta Sv.$$

Плотность тока в векторной форме

$$\vec{j} = en\vec{v}.$$

Вектор $\vec{j}$ совпадает по направлению с вектором $\vec{v}$.

Закон Ома для однородного участка цепи

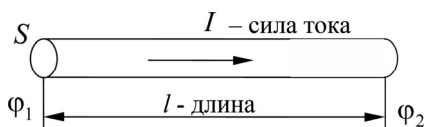


Рис. 5.3

Однородный участок электрической цепи – участок цепи (сопротивление), где на электроны действует только электрическое поле (сила Кулона):

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = \frac{U}{R},$$

где $U = \Phi_1 - \Phi_2$, ($\Phi_1 > \Phi_2$) – разность потенциалов (рис. 5.3); R – сопротивление проводника.

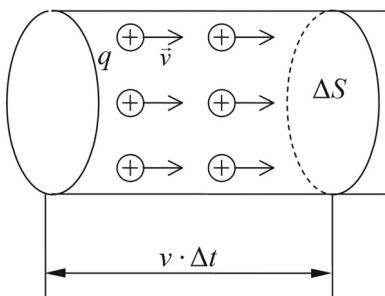


Рис. 5.2

$$[R] = \frac{[\varphi]}{[I]} = \frac{В}{А} = \text{Ом}.$$

Единица измерения сопротивления – Ом.

Для однородного по химическому составу проводника в виде цилиндра длиной l и площадью поперечного сечения S :

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

ρ – удельное сопротивление (находится из таблиц физических постоянных). **Удельное сопротивление** численно равняется сопротивлению проводника, изготовленного из определенного вещества, длиной 1 м и площадью его поперечного сечения 1 м².

$$[\rho] = [R] \frac{[S]}{[l]} = \text{Ом} \frac{\text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Сопротивление электрическому току согласно представлениям классической физики обусловлено «столкновением» электронов, дрейфующих во внешнем электрическом поле, с ионами кристаллической решетки металла. Носитель заряда ускоряется внешним полем, и его потенциальная энергия переходит в кинетическую энергию направленного движения, которая при столкновении с ионом передается ему (переходит во внутреннюю энергию), а затем вновь ускоряется и сталкивается. Такое движение можно характеризовать средней скоростью направленного движения. Чем чаще сталкивается носитель, тем меньше средняя скорость носителя в электрическом поле определенной напряженности. Следовательно, носитель испытывает большее сопротивление своему направленному движению (току).

С точки зрения современной физики электрическое сопротивление обусловлено **неоднородностью** в проводнике, а не столкновениями с ионами кристаллической решетки. Если бы этих неоднородностей не было, то и сопротивление протеканию тока равнялось нулю.

Параллельное и последовательное соединение проводников (сопротивлений).

При **последовательном** (рис. 5.4) соединении проводников сила тока в любых частях цепи одна и та же.

Напряжение между крайними точками цепочки последовательно соединенных сопротивлений равно сумме напряжений на отдельных участках (сопротивлениях) этой цепи, а значит, и общее сопротивление равно сумме всех сопротивлений:

$$R_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

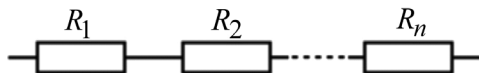


Рис. 5.4

При **параллельном** соединении резисторов (рис. 5.5) величина, обратная общему сопротивлению, равна

$$\frac{1}{R_{\text{общ}}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

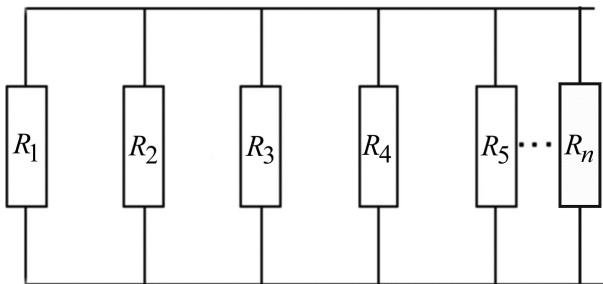


Рис. 5.5

Если цепь можно разбить на вложенные блоки (участки), последовательно или параллельно включенные между собой, то сначала считают сопротивление каждого блока, затем заменяют каждый блок его эквивалентным сопротивлением. Таким образом, находится общее (одно искомое) сопротивление цепи.

Закон Джоуля–Ленца. Как отмечалось выше, кинетическая энергия направленного движения носителей заряда передается ионам кристаллической решетки при протекании электрического тока на однородном участке, т. е. идет на нагрев проводника. Количество тепла,

выделяемое на участке с сопротивлением R при прохождении тока I в течение времени Δt :

$$\Delta Q = I^2 R \Delta t ,$$

или, исходя из закона Ома для участка цепи, можно записать:

$$\Delta Q = \frac{U^2}{R} \Delta t = IU \Delta t .$$

Мощность выделяемой теплоты:

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = IU .$$

Для поддержания постоянного тока, протекающего через проводник, необходимо поддерживать на концах проводника постоянное напряжение. Для этого необходимо компенсировать носителям тока потери энергии на тепло, т. е. совершать над ними работу сторонними силами.

Сторонние силы – это силы, природа которых отличается от сил электростатического поля. Всякое устройство, в котором возникают сторонние силы, является источником тока. Источником постоянного тока являются, например, гальванические элементы.

Электродвижущая сила (ЭДС) действующая на некотором участке цепи – это физическая величина, равная отношению работы сторонних сил по перемещению заряда по этому участку цепи, к величине переносимого заряда:

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст.сил}}}{q} ,$$

где q – заряд, на перемещение которого из области с меньшей в область с большей потенциальной энергией сторонние силы совершили работу $A_{\text{ст.сил}}$.

Единица измерения ЭДС – такая же, как и единица потенциала – вольт:

$$[\varepsilon] = \frac{[A]}{[q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В} .$$

Работа сторонних сил происходит внутри источника тока, в котором на заряды действует также сила Кулона (неоднородный участок цепи).

Физическая величина, равная отношению суммарной работы, совершаемой кулоновскими и сторонними силами при перемещении по некоторому участку цепи заряда q , к величине этого заряда, называется **напряжением на участке цепи**, или просто **напряжение**:

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{12}.$$

Если на рассматриваемом участке нет ЭДС, то напряжение равно разности потенциалов.

Закон Ома для неоднородного участка цепи (содержащего ЭДС) можно записать в следующей форме:

$$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}) / (R + r).$$

Простейшая цепь электрического тока (рис. 5.6) включает в себя сопротивление R , соединительные провода (сопротивлением которых пренебрегают), гальванический элемент, характеризующийся ЭДС и внутренним сопротивлением r .

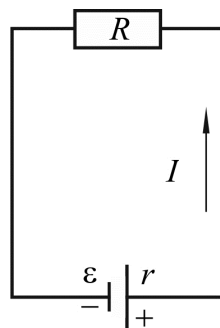


Рис. 5.6

Исходя из закона сохранения энергии, можно записать, что сторонние силы, совершая работу по перемещению носителей тока, увеличивают их потенциальную энергию, которая переходит во внутреннюю энергию проводников при движении носителей во внешней однородной цепи (сопротивление R) и во внутренней цепи (внутри источника тока, на сопротивление r):

$$\varepsilon I = I^2 R + I^2 r.$$

Тогда **закон Ома для полной (замкнутой)³² цепи**

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

³² В замкнутой цепи полная работа электрических сил равна нулю.

Примеры решения задач

Задача 1. Какова напряженность поля в медном проводнике сечением $1,5 \text{ мм}^2$ при силе тока $2,0 \text{ А}$.

Дано:	Решение
$S = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ $I = 2,0 \text{ А}$ $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $E = ?$	Необходимо внутри проводника определить напряженность электрического поля, которая является причиной возникновения электрического тока в металле. Характеристики поля внутри проводника и силы тока в нем связаны законом Ома для участка цепи:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}, \quad (5.1)$$

где $R = \rho l / S$ – сопротивление проводника; U – напряжение.

Напряженность поля связана с напряжением (разностью потенциалов):

$$E = \frac{U}{l}. \quad (5.2)$$

Исходя из выражений (5.1) и (5.2), получим

$$U = IR = I\rho \frac{l}{S},$$

$$E = \frac{U}{l} = \frac{I\rho}{S}, \quad (5.3)$$

где $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – удельное сопротивление меди.

Выражение (5.3) – общее решение задачи. Проверим размерность полученной величины:

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

Размерность, полученная из выражения (5.3), соответствует размерности напряженности.

По выражению (5.3) произведем вычисления для заданных значений величин:

$$E = \frac{I\rho}{S} = \frac{2,0 \cdot 1,7 \cdot 10^{-8}}{1,5 \cdot 10^{-6}} = 2,3 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

Ответ: $E = 2,3 \cdot 10^{-2} \text{ В/м}$

Задача 2. Найти скорость упорядоченного движения электронов в медном проводе сечением $2,0 \text{ мм}^2$ при силе тока $5,0 \text{ А}$, считая, что на каждый атом приходится один электрон проводимости.

Дано:

Cu (медь)

$S = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$

$I = 5,0 \text{ А}$

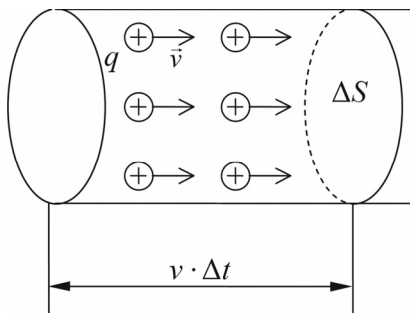
$\rho_{\text{пл}} = 8,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$

$\mu = 63,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$

$Z = 1$

$v_{\text{др}} = ?$

Решение



Сила тока связана со скоростью дрейфа выражением

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enSv_{\text{др}}, \quad (5.4)$$

где $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ – элементарный заряд (модель заряда электрона); n – концентрация электронов в проводнике; S – площадь поперечного сечения; $v_{\text{др}}$ – скорость дрейфа электронов в поле.

Определим концентрацию электронов исходя из закона Авогадро:

$$n = \frac{\Delta N}{\Delta V} = \frac{\rho_{\text{пл}}}{\mu} N_A Z, \quad (5.5)$$

где $\rho_{\text{пл}}$ – плотность меди, μ – молярная масса меди;
 $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; Z – валентность меди.

Из уравнений (5.4) и (5.5) выразим $v_{\text{др}}$:

$$v_{\text{др}} = \frac{I\mu}{e\rho_{\text{пл}}N_A ZS}. \quad (5.6)$$

Выражение (5.6) – общее решение задачи. Проверим размерность полученной величины:

$$[v_{\text{др}}] = \frac{\text{А} \cdot \text{кг} / \text{моль}}{\text{Кл} \cdot \text{кг} / \text{м}^3 \cdot 1 / \text{моль} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Размерность, полученная из выражения (5.6), соответствует размерности скорости.

По выражению (5.6) произведем вычисления для заданных значений величин:

$$v_{\text{др}} = \frac{I\mu}{e\rho_{\text{пл}}N_A ZS} = \frac{5 \cdot 63,5 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,6 \cdot 10^3 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Ответ: $v_{\text{др}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$

Задача 3. К источнику с ЭДС 5,0 В и внутренним сопротивлением 2,0 Ом подключено сопротивление 10 Ом. Найти силу тока в цепи, напряжение на зажимах источника, а также тепло, выделившееся на внешнем сопротивлении за 30 с.

Дано:

$$\mathcal{E} = 5,0 \text{ В}$$

$$r = 2,0 \text{ Ом}$$

$$R = 10 \text{ Ом}$$

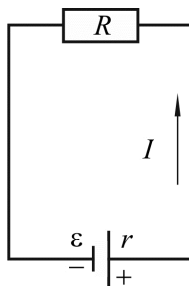
$$t = 30 \text{ с}$$

$$I = ?$$

$$U = ?$$

$$Q = ?$$

Решение



Исходя из закона Ома для полной цепи, найдем силу тока:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (5.7)$$

Выделившееся тепло Q во внешней цепи найдем исходя из закона Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t. \quad (5.8)$$

Падение напряжения на зажимах источника найдем исходя из закона Ома для участка цепи:

$$U = IR. \quad (5.9)$$

Подставив значения в выражения (5.7), (5.8) и (5.9) соответственно, вычислим:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{5}{10 + 2} = 0,42 \text{ (А)};$$

$$Q = I^2 R t = 0,42^2 \cdot 10 \cdot 30 = 52,9 \text{ (Дж)};$$

$$U = IR = 0,42 \cdot 10 = 4,2 \text{ (В)}.$$

Ответ:. $I = 0,42 \text{ А}$; $Q = 53 \text{ Дж}$; $U = 4,2 \text{ В}$.

5.2. ОБЩАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ НА ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Ниже приведен алгоритм решения задач: на нахождение значений силы тока, скорости упорядоченного движения электронов, сопротивления проводников; а также расчеты с применением закона Ома для однородного участка цепи.

1. При чтении условия задачи и его краткой записи необходимо перевести все заданные значения величин в систему «СИ».

2. При повторном чтении представить и нарисовать принципиальную «динамическую картину» электрического тока в металле.

3. Исходя из краткого условия задачи, указать на рисунке известные и неизвестные величины.

4. На понятийном уровне представить физическую сущность (картину) неизвестных и известных величин.

5. Записать математические выражения, связывающие эти величины. При необходимости записать причинно-следственную связь между основными характеристиками постоянного тока в виде закона Ома для участка цепи.

6. На основании математических выражений составить и решить уравнения с неизвестными величинами, выразив их в общем математическом виде через известные.

7. Проверить размерность полученных общих математических выражений, что является одним из критериев правильного решения задачи.

8. Выполнить расчет.

Алгоритм решения задач на нахождение работы электрического тока (закон Джоуля–Ленца), вычисления электродвижущей силы, на применение закона Ома для полной цепи.

а) *Закон Джоуля–Ленца*

1. Подобно пункту 1 (см. выше).

2. Пункты 3, 4, 5, 6, 7, 8 выполняются подобным образом (см. выше).

б) *Закон Ома для полной цепи*

1. Подобно пункту 1 (см. выше).

2. Нарисовать схему полной электрической цепи. Представить силы, действующие на дрейфующие свободные электроны в замкнутой цепи: участки цепи, где теряется энергии носителями тока на тепло; участки цепи, где увеличивается энергии электронов.

3. Далее, используя законы Ома для участка и полной цепи, следовать пунктам 3, 4, 5, 6, 7, 8 (см. выше).

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение электрического тока.
2. Условия возникновения электрического тока.
3. Запишите математическое выражение для силы тока и дайте ее определение.
4. Чем обусловлено сопротивление электрическому току проводником?
5. Что такое удельное сопротивление проводника?
6. Последовательное и параллельное соединение проводников.
7. Закон Ома для однородного участка цепи.
8. В каких единицах измеряется сила тока?
9. Работа электрического тока на однородном участке цепи.
10. Закон Джоуля–Ленца. Мощность электрического тока.
11. Электродвижущая сила (ЭДС). Единица измерения ЭДС.
12. Неоднородный участок цепи. Внутреннее сопротивление источника тока.
13. Нарисовать электрическую схему замкнутой (полной) цепи.
14. Из каких элементов состоит замкнутая электрическая цепь?
15. Применение закона сохранения энергии для полной цепи.
16. Закон Ома для полной цепи.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Все необходимые для решения задач данные приведены в приложении Б. Основные формулы вынесены в таблицу приложения Г.

Уровень 1

5.1. Сколько электронов проходит через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока 32 мкА?

5.2. Обмотка реостата сопротивлением 8 Ом выполнена из алюминиевой проволоки с площадью поперечного сечения 1 мм^2 . Какова длина проволоки?

5.3. Как изменится показание амперметра, если от схемы, приведенной на рис. 5.7, а, перейти к схеме, показанной на рис. 5.7, б? Напряжение, поданное на концы цепи, остается прежним.

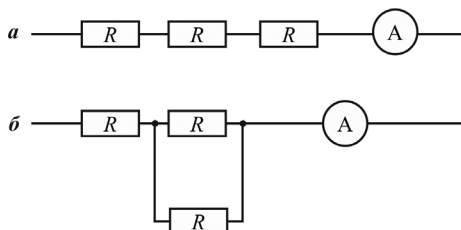


Рис. 5.7

5.4. Цепь состоит из трех последовательно соединенных проводников, подключенных к источнику с напряжением 18 В. Сопротивление первого проводника 6,0 Ом, второго 10 Ом и напряжение на концах третьего проводника 2 В.

5.5. Через медный проводник длиной 150 м и площадью поперечного сечения 4 мм^2 протекает ток силой 0,50 А. Сколько теплоты выделится за 60 с?

5.6. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление r источника тока, если во внешней цепи при силе тока 4,0 А выделяется мощность 10 Вт, а при силе тока 2,0 А мощность 8,0 Вт.

5.7. Даны два источника тока с ЭДС $= 2 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением 0,5 Ом. Последовательно или параллельно нужно соединить батареи, чтобы получить больший ток во внешней цепи, имеющей сопротивление 1 Ом.

5.8. На баллоне сетевой лампы накаливания написано: 220 В, 60 Вт. Найти силу тока и сопротивление в рабочем режиме.

5.9. При подключении сопротивления к батарее элементов с ЭДС 5,0 В вольтметр показал напряжение на сопротивление 4,5 В, а амперметр – силу тока 0,25 А. Каково внутренне сопротивление батареи и какая тепловая мощность выделяется на ней?

5.10. Пять параллельно соединенных ламп сопротивлением 1000 Ом, рассчитанных на напряжения 150 В, питаются через реостат от сети 180 В. Какова мощность электрического тока реостате?

Уровень 2

5.11. Электрическую лампу сопротивлением 200 Ом, рассчитанную на напряжение 100 В, надо питать от сети с напряжением 220 В. Какой длины нихромовый проводник сечением $0,90 \text{ мм}^2$ надо включить последовательно с лампой?

5.12. Найти скорость упорядоченного движения электронов в проводнике сечением 8 мм^2 при силе тока 5 А , если концентрация электронов проводимости 10^{28} м^{-3} .

5.13. Из серебряной проволоки длиной 100 м и площадью поперечного сечения 15 мм^2 намотана катушка. Найти сопротивление катушки.

5.14. Требуется изготовить нагревательную спираль для электрической плитки 750 Вт , которая подключена к напряжению 220 В . Какой длины необходимо взять нихромовую проволоку диаметром $2,00 \text{ мм}$. Удельное сопротивление нихрома $1,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$.

5.15. Лампочка и резистор, соединенные последовательно, подключены к источнику тока. Напряжение на зажимах лампочки равно 20 В , сопротивление резистора 10 Ом . Внешняя цепь потребляет мощность 100 Вт . Найти силу тока в цепи.

5.16. Две батареи аккумуляторов, параллельно подсоединены одноименными полюсами. ЭДС первой $5,0 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление $1,0 \text{ Ом}$, ЭДС второй $4,0 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление $0,50 \text{ Ом}$. Параллельно к аккумуляторам подключено сопротивление 10 Ом . Найти силу тока в батареях и сопротивлении.

5.17. Два последовательно соединенных гальванических элемента с одинаковыми ЭДС, равными $3,0 \text{ В}$, и внутренними сопротивлениями $1,0$ и $2,0 \text{ Ом}$ замкнуты на внешнее сопротивление 10 Ом . Найти разность потенциалов на всех элементах цепи.

5.18. Гальванический элемент, имеющий ЭДС $4,0 \text{ В}$ и внутреннее сопротивление $1,0 \text{ Ом}$, замкнут на внешнее сопротивление 19 Ом . С каким КПД работает элемент?

5.19. От генератора с ЭДС 110 В требуется передать электроэнергию на расстояние 250 м . Потребляемая мощность 1000 Вт . Найти минимальное сечение медных проводов, если потери в проводах не должны превышать 5% .

5.20. Троллейбус массой 10 т движется равномерно со скоростью 72 км/ч . Найти силу тока в обмотке двигателя, если напряжение 550 В и КПД равен 80% .

Уровень 3

5.21. Сила тока в проводнике равномерно нарастает от 0 до 1 А в течение времени 10 с . Определить заряд, прошедший по проводнику.

5.22. Какие сопротивления можно получить, имея три резистора по 6 Ом ?

5.23. Имеется моток медной проволоки, покрытой очень тонкой лаковой изоляцией. Как, имея весы и омметр, найти длину проволоки и площадь поперечного сечения?

5.24. При ремонте электрической плитки спираль была укорочена на 0,1 первоначальной длины. Во сколько раз изменилась мощность плитки?

5.25. Четыре лампы, рассчитанные на напряжение 3,0 В и силу тока 0,30 А, надо включить параллельно и питать от источника напряжением 5,4 В. Резистор какого сопротивления надо включить последовательно лампам? Как изменится накал ламп, если одну из них выключить?

5.26. Источник тока имеет сопротивление, сравнимое с сопротивлением вольтметров. Один вольтметр, подключенный к зажимам источника, показал 10 В. Другой вольтметр, присоединенный к источнику вместо первого, показал 15 В. Когда же эти вольтметры соединили последовательно и подключили к зажимам источника, то первый показал 4 В, а второй 12 В. Найти ЭДС источника.

5.27. Электрическая схема, показанная на рис. 5.8, составлена из идеальной (внутреннее сопротивление равно нулю) батареи с ЭДС ε ,

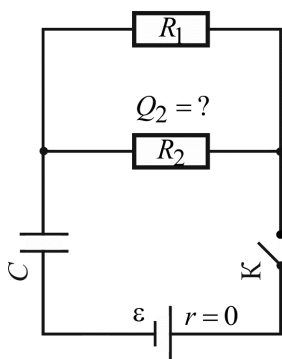


Рис. 5.8

двух резисторов с сопротивлениями R_1 и R_2 , конденсатора емкостью C и ключа K . В начальном состоянии ключ разомкнут, конденсатор разряжен. Какое количество теплоты Q_2 выделится на резисторе R_2 за **большое** время после замыкания ключа?

5.28. Два одинаковых плоских конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику электрического тока с постоянной ЭДС. Внутрь одного из них вносят диэлектрик с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 9$. Диэлектрик заполняет все пространство между обкладками. Как и во сколько раз изменится напряженность электрического поля в этом конденсаторе?

5.29. Решить предыдущую задачу для случая, когда конденсаторы после зарядки отключаются от источника ЭДС

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Петров Н.Ю.* Физика. Вводный курс. Механика: учеб. пособие / Н.Ю. Петров, Е.И. Кренева, М.Р. Мирсияпов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 168 с.
2. Физика. Вводный курс. Основы молекулярной физики и термодинамики: учеб. пособие / Н.Ю. Петров, Е.И. Кренева, Н.В. Тарасенко, М.Р. Мирсияпов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 132 с.
3. *Горлов Б.Б.* Физика. Теория, задачи, тесты: учеб. пособие для поступающих в вузы, перераб. и доп. / Б.Б. Горлов, А.В. Баранов, Г.Е. Невская. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 280 с.
4. Физическая энциклопедия [в 5 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров, редкол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М.: Сов. энцикл., 1988. – Т. 1. – 704 с.
5. Физическая энциклопедия [в 5 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров, редкол.: Д.М. Алексеев [и др.]. – М.: Сов. энцикл., 1990. – Т. 2. – 703 с.
6. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. В 5 т. Том 3. Электричество: учеб. пособие / Д.В. Сивухин. – 4-е изд., стереотип. – М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004. – 656 с.
7. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 8-е изд., стереотип. – М.: Академия, 2009. – 719 с.
8. *Дмитриева В.Ф.* Основы физики: учеб. пособие для студентов вузов / В.Ф. Дмитриева, В.Л. Прокофьев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 527 с.
9. *Мухачев В.А.* Электростатика и магнетизм: учеб. пособие / В.А. Мухачев. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. – 131 с.
10. Элементарный учебник физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм: учеб. пособие / под ред. Г. С. Ландсберга. – 12-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 480 с.
11. *Леб Л.* Статическая электризация / пер. с англ. В.М. Фридкина. – М.: Гос. энергетич. Изд-во, 1963. – 408 с.
12. *Ашкинази Л.* Что же такое электризация трением? / Л. Ашкинази // Квант. – 1985. – № 6. – С. 16–19.
13. *Baytekin H.T., Patashinski A.Z., Branicki M., Baytekin B., Soh S., Grzybowski B.A.* The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification // Science. 2011. – V. 333. – P. 308.

14. *Калашников С.Г.* Электричество: учеб. пособие / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереотип. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.
15. *Савельев И.В.* Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество: учеб. пособие / И.В. Савельев. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1970. – 432 с.
16. *Мякишев Г.Я.* Физика. Электродинамика. 10–11 кл. Профильный уровень: учебник для общеобразоват. учрежд. / Г.Я. Мякишев, А.З. Сияков, Б.А. Слободсков. – 10-е изд., стереотип. – М.: Дрофа, 2010. – 476 с.
17. The SI brochure (англ.) Брошюра СИ на сайте Международного бюро мер и весов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bipm.org/>
18. CGPM (2011). On the possible future revision of the International System of Units, the SI, Comptes Rendus des Séances de la XXIV Conférence Générale, Resolution 1, 2011, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, <http://www.bipm.org/en/convention/cgpm/resolutions.html>
19. ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин. – Взамен ГОСТ 8.417–81.; введ. 01.09.2003. – М.: Изд-во Стандартиформ, 2010. – 32 с.
20. Symbols, Units and Nomenclature in Physics: Document U. I. P. 20 (1987). – International Union of Pure and Applied Physics. S. U. N. Commission / пер. с англ. А.А. Радцига. – 60 p.
21. Symbols, units, nomenclature and fundamental constants in Physics: 1987 revision (2010 reprint). – International Union of Pure and Applied Physics. Commission C2 – SUNAMCO / Prepared by E. Richard and Cohen Pierre Giacomo. – 67 p.
22. Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry / E.R. Cohen et al. – IUPAC Green Book, 3rd Edition, 2nd Printing, IUPAC & RSC Publishing, Cambridge, 2008 – 236 p.
23. *Штыгашев А.А.* Задачи по физике. Механика. Молекулярная физика и термодинамика. Электричество: учеб. пособие / А.А. Штыгашев, Ю.Г. Пейсахович. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 160 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Тесты для самостоятельного решения

*Методические указания к выполнению зачетной работы
по разделу «Электростатика и законы постоянного тока»*

1. Зачетная работа содержит шесть заданий: три задания части **А** и три задания части **Б**.
2. В заданиях части **А** предлагается выбрать верный вариант из предложенных. Каждое задание должно сопровождаться кратким решением / пояснением.
3. При выполнении зачетной работы требуется обязательно привести развернутые решения / пояснения к заданиям частей **Б**.
4. Возможные оценки заданий частей **А** – 0, 1 балл.
5. Возможные оценки заданий части **Б** – 0, 1, 2 балла.

ВАРИАНТ 1

Часть А

А1. Установить соответствие между формулой и физическим законом.

Формула

- 1) $I = U/R$
- 2) $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$
- 3) $\varepsilon = A_{\text{ст}}/q$

Закон

- а) Закон Ома для полной цепи
- б) Электродвижущая сила
- в) Закон Ома для участка цепи

1	...
2	...
3	...

вставьте соответствующие буквы

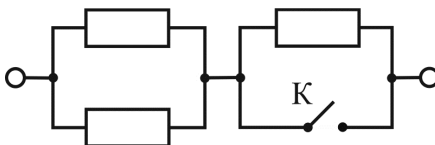
А2. Альфа-частица, являющаяся ядром атома гелия ${}^4_2\text{He}$, попадает в пылинку, несущую избыточный электрон, и застревает в ней. Заряд пылинки после этого равен

- 1) 3 Кл; 2) 1 Кл; 3) $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; 4) $3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Правильный ответ . . .

укажите номер

А3. На участке цепи, изображенном на рисунке, сопротивление каждого из резисторов равно R .



- 1) $1/2 R$
2) R
3) $2R$
4) $3R$

Полное сопротивление участка при замкнутом ключе K равно . . .

укажите номер

Часть Б

Б1. Точечные заряды 40 и (-10) нКл расположены на расстоянии 10 см друг от друга. Где следует поместить точечный заряд q , чтобы он находился в состоянии равновесия? (округлите ответ до целого числа) . . .

численное значение

Б2. Можно ли в эксперименте получить заряды, равные $q_1 = 8,0 \cdot 10^{-20}$ Кл, $q_2 = -4,8 \cdot 10^{-19}$ Кл?

Правильный ответ (*ответ обоснуйте*) . . .

Б3. В вершины правильного шестиугольника со стороной A помещены друг за другом точечные заряды $+q, +q, +q, -q, -q, -q$. Найдите силу F , действующую на заряд $+q$, который помещен в центре шестиугольника.

Правильный ответ . . .

численное значение

ВАРИАНТ 2

Часть А

A1. Установить соответствие между формулой и физическим законом:

Формула	Закон
1) $Q = I^2 R t$	а) Закон Джоуля–Ленца
2) $\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{r}_{12}$	б) Электродвижущая сила
3) $\varepsilon = A_{\text{ст}}/q$	в) Закон Кулона

1	...
2	...
3	...

вставьте соответствующие буквы

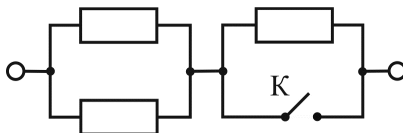
A2. β^- -частица, попадает в пылинку, несущую избыточный протон, и застревает в ней. Заряд пылинки после этого равен

- 1) 0 Кл; 2) 1 Кл; 3) $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; 4) $3,2 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Правильный ответ . . .

укажите номер

A3. На участке цепи, изображенном на рисунке, сопротивление каждого из резисторов равно R .



- 1) $1/2 R$
 2) R
 3) $3/2 R$
 4) $3R$

Полное сопротивление участка при **разомкнутом** ключе К равно . . .

укажите номер

Часть Б

Б1. Два небольших шарика массой по 10 мг, имеющие одинаковые заряды q , подвешены в одной точке на невесомых нерастяжимых диэлектрических нитях длиной по 30 см. Каждая нить образует угол 30° с вертикалью. Найти значение q ?

Правильный ответ . . .

численное значение

Б2. Определите силу электростатического взаимодействия электрона с ядром в атоме водорода. Считайте, что расстояние электрона от ядра равно $0,5 \cdot 10^{-8}$ см.

Правильный ответ . . .

численное значение

Б3. Электрический чайник мощностью 2,2 кВт рассчитан на включение в электрическую сеть напряжением 220 В. Определите силу тока в нагревательном элементе чайника при его работе в такой сети. Ответ приведите в амперах.

Правильный ответ . . .

численное значение

ВАРИАНТ 3

Часть А

А1. Установить соответствие между формулой и физическим законом:

Формула

1) $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

2) $\varphi = \frac{W_p}{q}$

3) $I = U/R$

Закон

- а) Потенциал электростатического поля
- б) Напряженность электрического поля
- в) Закон Ома для участка цепи

1	...
2	...
3	...

вставьте соответствующие буквы

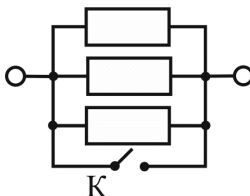
A2. Как изменится сила тока, протекающего по проводнику, если напряжение между концами проводника увеличить в два раза, а площадь его сечения уменьшить в два раза?

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

Правильный ответ ...

укажите номер

A3. На участке цепи, изображенном на рисунке, сопротивление каждого из резисторов равно R .



- 1) R
- 2) $3R$
- 3) $3/2 R$
- 4) 0

Полное сопротивление участка при **замкнутом** ключе K равно ...

укажите номер

Часть Б

Б1. Одинаковые по модулю, но разные по знаку заряды $18,0$ нКл расположены в двух вершинах равностороннего треугольника. Стороны треугольника 200 см. Определите напряженность поля в третьей вершине треугольника.

Правильный ответ ...

численное значение

Б2. Какой угол α с вертикалью составляет нить, на которой висит маленький заряженный шарик массой $0,25$ г, помещенный в горизон-

тальное однородное электростатическое поле напряженностью $1,0 \cdot 10^6$ В/м? Заряд шарика равен 2,5 нКл.

Правильный ответ ...

численное значение

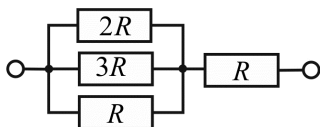
Б3. К источнику тока с ЭДС 4 В и внутренним сопротивлением 5 Ом подключили нагрузочное сопротивление. Чему оно должно быть равно, чтобы КПД источника был равен 50 %?

Правильный ответ ...

численное значение

ВАРИАНТ 4

Часть А



А1. На рисунке показан участок цепи постоянного тока. Каково сопротивление этого участка?

- 1) $17/11R$
- 2) $7R$
- 3) $11/17R$
- 4) $7/6R$

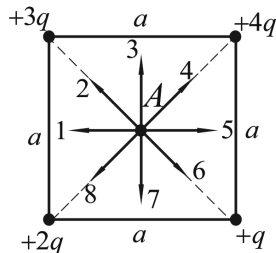
Правильный ответ ...

укажите номер

А2. Электростатическое поле создано системой точечных зарядов. Вектор напряженности $\vec{E}$ поля в точке А ориентирован в **направлении**

Правильный ответ ...

укажите номер



А3. К источнику тока с ЭДС 2 В подключен конденсатор емкостью 1 мкФ. Определите энергию, запасенную в конденсаторе

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

Часть Б

Б1. Чему равно время прохождения тока силой 5 А по проводнику, если при напряжении на его концах 120 В в проводнике выделяется количество теплоты, равное 540 кДж? Ответ записывать в секундах ...

численное значение

Б2. Два одинаковых резистора R параллельно подсоединены к источнику тока с ЭДС, равной ε , и внутренним сопротивлением r .

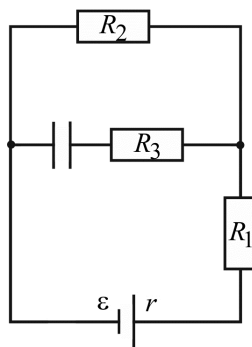
Через каждое сопротивление R протекает ток $I = \dots$

выразить через заданные величины

Б3. Конденсатор емкостью 1 мкФ присоединен к источнику постоянного тока с ЭДС 6 В и внутренним сопротивлением 2 Ом. Сопровождают резисторы $R_1 = 4$ Ом, $R_2 = 6$ Ом и $R_3 = 3$ Ом. Каков заряд на **левой** обкладке конденсатора?

Правильный ответ ...

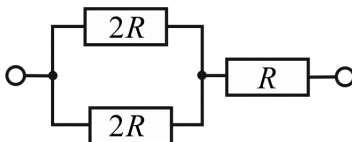
численное значение



ВАРИАНТ 5

Часть А

А1. На рисунке показан участок цепи постоянного тока. Каково сопротивление этого участка?

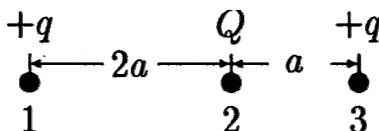


- 1) $3R$
- 2) $5R$
- 3) $2R$
- 4) $3/2R$

Правильный ответ ...

укажите номер

A2. Три точечных электрических заряда расположены на одной линии. Величина зарядов 1 и 3 равна $+q$. Сила, действующая на третий заряд, равна нулю. Величина заряда Q равна?



- 1) $+q/9$
- 2) $-q/9$
- 3) $+q/3$
- 4) $-q/4$

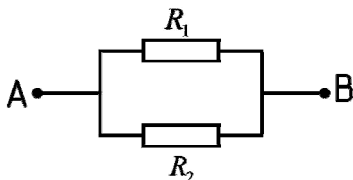
Правильный ответ ...

укажите номер

A3. К источнику тока с ЭДС 2 В подключен конденсатор емкостью 1 мкФ. Какую работу совершил источник при зарядке конденсатора? Эффектами излучения пренебречь.

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

Часть Б



Б1. Между точками **A** и **B** приложена разность потенциалов. Отношение теплот, выделяющихся на резисторах R_1 и R_2 за одну секунду, $Q_1/Q_2 = \dots$

выразить через заданные величины

Б2. Капелька масла радиусом 1,00 мкм, несущая заряд q , находится в равновесии в поле плоского конденсатора, расположенного горизонтально. Разность потенциалов между обкладками конденсатора 820 В. Расстояние между пластинами 0,008 м. Плотность масла $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$. Заряд q равен ...

численное значение

Б3. Электролампа, рассчитанная на напряжение $U_{\text{л}}$ и мощность $P_{\text{л}}$, подключается к сети напряжением U ($U > U_{\text{л}}$). Для нормального накала нити лампы к ней необходимо присоединить сопротивление $R = \dots$

выразить через заданные величины

Ответы на тестовые задания

Но- мер зада- ния	Вариант задания				
	В1	В2	В3	В4	В5
А1	1в 2а 3б	1а 2в 3б	1б 2а 3в	1	3
А2	3	1	4	7	2
А3	1	3	4	2	4
Б1	20 см от заряда 40 нКл, 10 см от заряда -10 нКл	$q =$ $= 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$	$E =$ $= 40,5 \text{ В/м}$	900 с	$Q_1/Q_2 = R_2/R_1$
Б2	q_1 – нель- зя, q_2 – можно	$F = 9,2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$	$\alpha = 45^\circ$	$I = \frac{\varepsilon}{R + 2r}$	$q =$ $= 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Б3	$F = k \frac{4q^2}{A^2}$	$I = 10 \text{ А}$	$R = 5 \text{ Ом}$	$q =$ $= -3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$	$R =$ $= \frac{U_{\text{л}}}{P_{\text{л}}} (U - U_{\text{л}})$

Приложение Б

Т а б л и ц а ПБ.1

Некоторые физические постоянные⁽¹⁾

Наименование	Обозначение	Значение
Скорость света в вакууме	c	$299\,792\,458$ м/с (точно) ⁽²⁾
Элементарный заряд	e	$1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Кл (точно) ⁽³⁾
Постоянная Ридберга	R_{∞}	$1,097\,373\,156\,850\,8(65) \cdot 10^7$ м ⁻¹ ⁽⁴⁾
Постоянная Планка	h	$6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ Дж · с (точно)
Приведенная постоянная Планка (постоянная Дирака)	$\hbar$	$\hbar = \frac{h}{2\pi}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256\,637\,06 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Электрическая постоянная (диэлектрическая постоянная)	ε_0	$\varepsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 c^2} = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Постоянная Кулона (электростатическая постоянная)	k	$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8,987\,551\,787 \cdot 10^9$ Н·м ² /Кл ² (или $\Phi^{-1} \cdot \text{м}$)
Постоянная тонкой структуры	α	$\alpha = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{e^2}{\hbar c}$
Атомная единица массы	$m_u = 1$ а.е.м.	$m_u \approx 1,660\,539 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя электрона	m_e	$m_e = \frac{2\hbar R_{\infty}}{c\alpha^2} \approx 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг $m_e \approx 5,485 \cdot 10^{-4}$ а.е.м.
Масса покоя протона	m_p	$m_p \approx 1,672\,621 \cdot 10^{-27}$ кг $m_p \approx 1,007\,276$ а.е.м.
Гравитационная постоянная	G	$6,674\,08(31) \cdot 10^{-11}$ Н · м ² /кг ²
Постоянная Авогадро	N_A, L	$6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ (точно)
Постоянная Больцмана	k, k_B	$1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К (точно)

Наименование	Обозначение	Значение
Универсальная газовая постоянная	R	$R = k_B N_A$
Средний радиус Земли	R_3	$6,371 \cdot 10^6$ м
Масса Земли	M_3	$5,9736 \cdot 10^{24}$ кг

⁽¹⁾ Официальный набор значений фундаментальных физических постоянных и коэффициентов для их перевода регулярно издается рабочей группой CODATA (*Committee on Data for Science and Technology* – Комитет по данным для науки и техники) по фундаментальным постоянным. Более подробную информацию можно найти на официальном веб-сайте CODATA: <http://www.codata.org/>.

⁽²⁾ Скорость света в вакууме – **фундаментальная физическая постоянная**, по определению, точно равная 299792458 м/с. Точность значения связана с тем, что с 1983 года метр в СИ определен как расстояние, которое проходит свет в вакууме за промежуток времени, равный $1/299792458$ с.

⁽³⁾ **Некоторые основные единицы СИ: килограмм, ампер, кельвин и моль перепределены на основании постоянной Планка, элементарного электрического заряда, постоянной Больцмана и числа Авогадро, значение которых было зафиксировано.** Изменения определений было принято 16 ноября 2018 года Международным комитетом мер и весов. Новые определения СИ вступят в силу 20 мая 2019 года. Более подробно можно прочитать в резолюции «О пересмотре Международной системы единиц (СИ)» Генеральной конференция по мерам и весам (CGPM) на своем 26-м заседании доступной по ссылке <https://www.bipm.org/en/CGPM/db/26/1/> (по состоянию на 31.12.2018).

⁽⁴⁾ Численное значение константы Ридберга, рекомендованное CODATA в 2014. Число в скобках после значения показывает квадратическую погрешность (квадратичное отклонение) в последних значащих цифрах на уровне 1σ (среднеквадратическое отклонение).

Таблица ПБ.2

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц*

Десятичный множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
Кратные			
10 ²⁴	иотта	Y	И
10 ²¹	зетта	Z	З

Окончание табл. ПБ.2

Десятичный множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
10^{18}	экса	E	Э
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
Дольные			
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а
10^{-21}	зепто	z	з
10^{-24}	иокто	y	и

* Наименования и обозначения единиц времени (минута, час, сутки), плоского угла (градус, минута, секунда), астрономической единицы, диоптрии и атомной единицы массы **не допускается** применять с приставками.

Таблица ПБ.3

Значения некоторых математических функций и констант

$e^1 = 2,718281828$ $\lg e = 0,434294481$ $\ln 10 = 2,302585093$ $\lg x = 0,4343 \ln x$	$\ln x = 2,3026 \lg x$ $\pi = 3,141592654$ $\pi^2 = 9,869604401$ $\sqrt{\pi} = 1,772453851$
--	--

Таблица ПБ.4

Примеры обозначения физических величин⁽¹⁾

Наименование величины		Обозначение	Единица СИ	
русское	международное		международное обозначение	русское обозначение
Пространство и время				
Время	Time	t	s	с
Диаметр	Diameter	d	m	м
Длина	Length	l, L, a	m	м
Объем, вместимость	Volume	V, v	m ³	м ³
Площадь	Area	A, S	m ²	м ²
Механические величины				
Масса	Mass	m	kg	кг
Мощность	Power	P	W	Вт
Работа	Work	W, A	J	Дж
Сила	Force	F	N	Н
Энергия	Energy	E, W	J	Дж
Энергия кинетическая	Kinetic energy	E_k, T, K	J	Дж
Энергия потенциальная	Potential energy	E_p, V, Φ, U	J	Дж
Электрические величины				
Диэлектрическая проницаемость (абсолютная) ⁽²⁾	Permittivity	ε	Ф · м ^{−1}	Ф · м ^{−1}

Продолжение табл. ПБ.4

Наименование величины		Обозначение	Единица СИ	
русское	международное		международное обозначение	русское обозначение
Диэлектрическая проницаемость (относительная)	Relative permittivity	ε_r, K	1	1
Напряженность электрического поля	Electric field (strength)	E	$V \cdot m^{-1}$	$B \cdot m^{-1}$
Объемная (пространственная) плотность электрического заряда (плотность заряда)	Charge density	ρ	$C \cdot m^{-3}$	$Кл \cdot м^{-3}$
Плотность заряда поверхностная	Surface charge density	σ	$C \cdot m^{-2}$	$Кл \cdot м^{-2}$
Плотность электрического тока	Electric current density	j, J	$A \cdot m^{-2}$	$A \cdot м^{-2}$
Сила тока	Electric current	I	A	A
Удельная электрическая проводимость	Conductivity	γ, σ, κ	$S \cdot m^{-1}$	$См \cdot м^{-1}$
Удельное электрическое сопротивление	Resistivity	ρ	$\Omega \cdot m$	$Ом \cdot м$
Электрическая емкость	Capacitance	C	F	Ф
Электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума)	Permittivity of vacuum, electric constant	ε_0	$F \cdot m^{-1}$	$Ф \cdot м^{-1}$
Электрическая проводимость	Conductance	G	S	См
Электрический дипольный момент	Electric dipole moment	p	$C \cdot m$	$Кл \cdot м$
Электрический заряд (количество электричества)	Quantity of electricity, electric charge	Q, q	C	Кл
Электрический потенциал	Electric potential	$V, \phi(\varphi)$	V	B

Наименование величины		Обозначение	Единица СИ	
русское	международное		международное обозначение	русское обозначение
Электрическое напряжение (разность потенциалов, напряжение) ⁽³⁾	Potential difference, electric potential difference	U, V	В	В
Электрическое сопротивление	Resistance, electric resistance	R	Ω	Ом
Электродвижущая сила	Electromotive force	E, ε	В	В
Величины атомной физики				
Масса атома	Atomic mass	m_a	кг	кг
Масса нейтрона	Neutron mass	m_n	кг	кг
Масса протона	Proton mass	m_p	кг	кг
Масса электрона	Electron mass	m_e	кг	кг
Масса ядра	Nuclear mass	m_N	кг	кг
Число нуклонов (массовое число)	Nucleon number, mass number	A	1	1
Число протонов (атомный номер, зарядовое число атомного ядра)	Proton number, atomic number	Z	1	1
Число нейтронов	Neutron number	N	1	1
Элементарный заряд	Elementary charge	e	С	Кл

⁽¹⁾ Величины, обозначенные **жирным** цветом – **векторные**. Таблица составлена на основе [17–22].

⁽²⁾ В отечественной литературе символ ε чаще всего используется для обозначения относительной диэлектрической проницаемости, а для абсолютной диэлектрической проницаемости используется сочетание $\varepsilon\varepsilon_0$.

⁽³⁾ Также используются обозначения $\Delta V, \Delta\phi(\Delta\varphi)$. В англоязычной литературе часто используется наименование Voltage. Следует отметить, что в общем случае напряжение между двумя точками отличается от разницы потенциалов в этих точках на работу сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда.

Физические свойства некоторых веществ

Плотность			
Вещество	Значение плотности в кг/м ³	Вещество	Значение плотности в кг/м ³
Водород при н.у. ⁽¹⁾	0,0899	Глицерин	1260
Сухой воздух при н.у.	1,29	Спирт	800
Гелий при н.у.	0,178	Ртуть (0 °С)	13 600
Водяной пар (100 °С) при н.у.	0,598	Бальса	150
Кислород при н.у.	1,43	Пробка	200
Углекислый газ при н.у.	1,98	Сосна	400
Бензин	710	Бакаут	1280
Эфир	720	Парафин	900
Ацетон	792	Лёд	900
Спирт	800	Алюминий	2700
Керосин	820	Мрамор	2700
Масло машинное	910	Цинк	7100
Вода (4 °С)	1000	Сталь, железо	7800
Вода морская	1030	Медь	8900
Молоко цельное	1040	Свинец	11 350
Удельная теплоемкость ⁽¹⁾			
Вещество	$c_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ⁽²⁾	Вещество	Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Водород	14 300	Вода (0 °С)	4,220
Гелий	5190	Вода (10 °С)	4,190
Водяной пар (100 °С)	2078	Вода (20 °С)	4,180
Азот	1040	Этанол	2440
Воздух (100 % влажность)	1,030	Лед (0 °С)	2110
Воздух (сухой, 27 °С)	1,010	Алюминий	897
Кислород	918	Сталь	462
		Железо	449

Окончание табл. ПБ.5

		Бронза	420
		Медь	385
		Латунь	370
		Олово	227
		Ртуть	140
		Свинец	130
Диэлектрическая проницаемость			
Вещество	ε	Вещество	ε
Вакуум	1	Масло касторовое	4,5
Воздух	1,0006	Слюда	6,0
Керосин	2,1	Стекло	7,0
Масло трансформаторное	2,2	Вода	81
Парафин	2,2	Анилин	84
Эбонит	3,0	Титанит бария	1,2·10 ³
Удельное электрическое сопротивление ⁽³⁾			
Вещество	ρ , $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$	Вещество	ρ , $\frac{\text{Ом}\cdot\text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,016	Никелин	0,40
Медь	0,017	Манганин	0,43
Алюминий	0,028	Константан	0,50
Железо	0,10	Ртуть	0,96
Вольфрам	0,055	Нихром	1,1
Платина	0,10	Фехраль	1,3
Сталь	0,12	Графит	13
Олово	0,12	Вода речная	10 ⁷ –10 ⁸
Свинец	0,21	Вода дистиллирован- ная	10 ⁹

⁽¹⁾ Значения приведены для $t = 25^\circ\text{C}$, $p = 100 \text{ кПа}$, если это не оговорено особо.

⁽²⁾ Кельвины (К) здесь можно заменять на градусы Цельсия ($^\circ\text{C}$), поскольку абсолютная температурная шкала и шкала Цельсия отличаются друг от друга лишь начальной точкой, но не величиной единицы измерения.

⁽³⁾ Данные приведены для веществ при температуре 20°C .

Приложение В

Пример оформления задачи

Дано:

Решение:

Найти:

Ответ:

Приложение Г

Основные физические формулы по разделам электростатика и законы постоянного тока

ЗАКОН КУЛОНА	
Закон сохранения электрического заряда	$q = q_1 + q_2 + \dots = \text{const}$
Закон Кулона	$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12},$ $\vec{e}_{12} = \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}, \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$ $\vec{r}_{12} = (x_2 - x_1)\vec{i} + (y_2 - y_1)\vec{j} + (z_2 - z_1)\vec{k}$
Закон Кулона в жидкой или газообразной диэлектрической среде	$\vec{F}_{12} = \frac{k}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \vec{e}_{12}$
НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	
Напряженность поля	$\vec{E} = \frac{\vec{F}_q}{q}$
Напряженность поля точечного заряда	$\vec{E} = k \frac{1}{\epsilon} \frac{q}{r^2} \vec{e}_r, \quad \vec{e}_r = \frac{\vec{r}}{r}$
Потенциал поля точечного заряда	$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{q}{r}$
Принцип суперпозиции для систем точечных зарядов	$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i = \frac{k}{\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \vec{e}_i,$ $\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i}$
Разность потенциалов	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1 \rightarrow 2}}{q} = \int_{\vec{r}_1}^{\vec{r}_2} \vec{F}(\vec{r}) d\vec{r}$
Разность потенциалов между двумя точками однородного поля, лежащими на одной силовой линии	$\varphi_1 - \varphi_2 = E \Delta x$
Потенциал проводящего шара радиусом R с зарядом Q	$\varphi = k \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{R}$

Продолжение таблицы

Напряженность поля созданного системой с непрерывным распределением зарядов	$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{k}{\varepsilon_{(q)}} \int \frac{dq(\vec{r})}{r^3} \vec{r}$
Потенциал их поля в среде с диэлектрической проницаемостью ε	$\varphi = \int \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r}$
Линейная плотность заряда	$\lambda = dq/dl$
Поверхностная плотность заряда	$\sigma = dq/dS$
Объемная плотность заряда	$\rho = dq/dV$
Напряженность поля равномерно заряженной плоскости	$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0\varepsilon}$
Напряженность поля в плоском конденсаторе	$E = \sigma / \varepsilon_0\varepsilon$
ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ	
Связь электрического заряда и потенциала	$q = C\varphi,$
Электрическая емкость плоского конденсатора	$C = \varepsilon_0\varepsilon S / d$
Электрическая емкость уединенной сферы (шара)	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R$
Параллельное соединение конденсаторов	$C = C_1 + C_2$
Последовательное соединение конденсаторов	$C^{-1} = C_1^{-1} + C_2^{-1}$
Энергия электрического поля заряженного конденсатора	$W = CU^2 / 2 = q^2 / 2C$
Плотность распределения энергии электрического поля	$w = \varepsilon_0\varepsilon E^2 / 2$
ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	
Сила тока	$I = \frac{dq}{dt}$
Закон Ома для однородного участка цепи	$I = (\varphi_1 - \varphi_2) / R = U / R$
Сопротивление проводника	$R = \rho \frac{l}{S}$
Зависимость сопротивления проводника от температуры	$R = R_0(1 + \alpha t)$
Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры	$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$

Окончание таблицы

Закон Ома для неоднородного участка цепи	$I = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}) / (R + r)$
Закон Ома для полной (замкнутой) цепи	$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$
Закон Джоуля-Ленца	$Q = I^2 R t$
Мощность тока на однородном участке цепи	$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$
Полная мощность источника тока	$P_\varepsilon = \varepsilon I$
Переданная во внешнюю цепь полезная мощность	$P = UI$
Потерянная в источнике тока мощность	$P_r = I^2 r$
Коэффициент полезного действия источника тока	$\eta = \frac{P}{P_\varepsilon} = \frac{R}{R + r}$
Параллельное соединение сопротивлений	$R^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1}$ $U = U_1 = U_2$ $I = I_1 + I_2$
Последовательное соединение сопротивлений	$R = R_1 + R_2$ $U = U_1 + U_2$ $I = I_1 = I_2$

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. КРАТКИЕ ИСТОРИЧЕСКИЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ	5
1.1. Исходные понятия и определения по разделу «Электричество».....	5
1.2. Основы решения задач	28
2. ЗАКОН КУЛОНА	31
2.1. Теоретический материал и примеры решения задач	31
2.2. Общая схема решения задач на закон Кулона.....	41
Вопросы для самоконтроля.....	41
Задачи для самостоятельного решения.....	42
3. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	46
3.1. Теоретический материал и примеры решения задач	46
3.2. Общая схема решения задач на определение напряженности и потенциала электрического поля	56
Вопросы для самоконтроля.....	57
Задачи для самостоятельного решения.....	57
4. ЭЛЕКТРОЕМКОСТЬ.....	61
4.1. Теоретический материал и примеры решения задач	61
4.2. Общая схема решения задач по разделу «Емкость».....	68
Вопросы для самоконтроля.....	69
Задачи для самостоятельного решения.....	69
5. ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	73
5.1. Теоретический материал и примеры решения задач	73

5.2. Общая схема решения задач на законы постоянного тока.....	84
Вопросы для самоконтроля.....	85
Задачи для самостоятельного решения.....	85
Библиографический список	89
Приложение А.....	91
Приложение Б	99
Приложение В	107
Приложение Г	108

**Петров Никита Юрьевич
Кренева Елена Ивановна
Тарасенко Наталья Валентиновна
Костюченко Владимир Яковлевич
Мирсияпов Марис Рафаэльевич**

ФИЗИКА

ВВОДНЫЙ КУРС

ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Учебное пособие

Редактор *Л.Н. Ветчакова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 12.03.2019. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.
Уч.-изд. л. 6,74. Печ. л. 7,25. Изд. № 355/18. Заказ № 569. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20