

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
Национальный авиационный университет

Е.Ю. Корчук

ФИЗИКА
Электродинамика и квантовая физика
Учебное пособие

Киев 2013

УДК 537:530.145(075.8)

ББК В3я7

К 703

Автор: *О.Ю. Корчук*

Рецензенти:

Є. В. Рильцев — д-р фіз.-мат. наук
(Міжнародна академія управління персоналом)

М. В. Головка — к.пед.наук
(Інститут педагогіки НАПН)

Ю. Т. Герасименко — к. фіз.-мат. наук
(Національний авіаційний університет)

Затверджено методично-редакційною радою Національного авіаційного університету (протокол № ___ від _____ 2013 р.).

В учебном пособии изложены законы электростатики, действия постоянного тока и магнитного поля тока, основные положения квантовой и ядерной физики, приведены упражнения для самостоятельной работы и контрольные вопросы, способствующие усвоению программного материала.

Для иностранных студентов подготовительных факультетов высших учебных заведений инженерно-технических специальностей.

К 703 **Фізика. Електродинаміка і квантова фізика:** навч. посібник / Корчук О.Ю. — К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2013. — 160 с.

У навчальному посібнику викладено закони електростатики, дії постійного струму і магнітного поля струму, основні положення квантової і ядерної фізики, наведено вправи для самостійної роботи і контрольні запитання, що сприяють засвоєнню програмного матеріалу.

Для іноземних студентів підготовчих факультетів вищих навчальних закладів інженерно-технічних спеціальностей.

УДК 537:530.145(075.8)

ББК В3я7

© Корчук Е.Ю., 2013

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.....	7
1.1. Элементарные частицы. Понятие об электронной теории.....	7
1.2. Проводники, диэлектрики, полупроводники.....	10
1.3. Виды электризации.....	13
1.4. Взаимодействие электрических зарядов. Закон Кулона.....	16
1.5. Электрическое поле. Напряжённость электрического поля.....	25
1.6. Работа по перемещению заряда в электростатическом поле.....	32
1.7. Потенциал. Разность потенциалов.....	36
1.8. Потенциальная и кинетическая энергия заряда.....	45
1.9. Электроёмкость проводника.....	47
1.10. Конденсаторы.....	50
1.11. Соединение конденсаторов.....	53
1.12. Энергия заряженного конденсатора.....	55
1.13. Опыт Милликена. Определение величины элементарного заряда.....	56
2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК.....	58
2.1. Условие возникновения и существования электрического тока.....	58
2.2. Постоянный ток. Сила тока. Плотность тока.....	59
2.3. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника.....	61
2.4. Соединение проводников.....	68
2.5. Источники тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для полной цепи.....	75
2.6. Последовательное и параллельное соединение источников тока.....	77
2.7. Добавочное сопротивление к вольтметру.....	78
2.8. Шунтирование измерительных приборов.....	80
2.9. Работа и мощность тока.....	82

2.10. Нагревание электрическим током. Закон Джоуля – Ленца.....	84
2.11. Выделение теплоты током в потребителях при последовательном и параллельном соединениях.....	86
2.12. Электрический ток в электролитах.....	88
2.13. Законы Фарадея.....	89
2.14. Электрический ток в газах.....	93
3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА И ЕГО ДЕЙСТВИЕ.....	96
3.1. Магнитное поле тока.....	96
3.2. Магнитные действия токов и постоянных магнитов.....	99
3.3. Индукция магнитного поля.....	102
3.4. Графическое изображение магнитных полей.....	104
3.5. Напряжённость магнитного поля. Магнитная проницаемость среды.....	107
3.6. Закон Био–Савара–Лапласа.....	109
3.7. Магнитный поток.....	112
3.8. Происхождение магнитного поля.....	114
3.9. Действие магнитного поля на проводник с током. Закон Ампера.....	117
3.10. Взаимодействие параллельных проводников с током. Определение единицы силы тока.....	119
3.11. Сила Лоренца.....	121
4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.....	124
4.1. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея. Правило Ленца.....	124
4.2. Вихревое поле. Индукционный ток.....	127
4.3. Самоиндукция. Индуктивность.....	129
4.4. Магнитные свойства вещества.....	131
5. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЕ СВЕТА	135
5.1. Тепловое излучение тел	135
5.2. Гипотеза Планка	137
5.3. Фотоэффект	139
5.4. Теория фотоэффекта. Фотоны	142

6. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА	145
6.1. Строение атома. Опыт Резерфорда	145
6.2. Квантовые постулаты Бора	149
6.3. Строение атомного ядра. Энергия связи ядра	150
6.4. Радиоактивность. Ядерные реакции	153
6.5. Цепные ядерные реакции	155
6.6. Ядерный реактор	158
6.7. Термоядерные реакции	159

ПРЕДИСЛОВИЕ

Содержание и структура пособия «Физика. Электродинамика и квантовая физика» соответствует программе по физике для подготовительных факультетов вузов в рамках кредитно-модульной системы обучения. «Электродинамика и квантовая физика» — это третий большой раздел физики, который студенты изучают во втором семестре в четвёртом модуле, после введения на занятиях по русскому языку основных конструкций языка.

Даны основные понятия электрического заряда, поля, действия электрического и электромагнитного полей, законы электростатики и электродинамики, описаны свойства электрических зарядов и электрических полей. Раскрыта природа электромагнитных явлений, электрических и магнитных свойств вещества. Изложены основные положения квантовой теории и законы фотоэффекта, описаны модели строения атомного ядра, явление радиоактивности и виды ядерных реакций.

Пособие адаптировано в соответствии с программой по русскому языку на данном этапе обучения и может быть использовано для изучения элементов научного стиля речи.

Учебная информация структурирована на разделы и подразделы, которые содержат адаптированные учебные тексты. В конце каждого подраздела пособия даётся список новых слов и словосочетаний, усвоение которых является необходимым условием овладения языком предмета в объёме данного курса. Все темы снабжены упражнениями с контрольными вопросами и практическими задачами для закрепления усвоенного материала. Ко всем задачам даны ответы. Тексты проиллюстрированы рисунками и графиками. Особое внимание уделено объяснению физической сути явлений в доступной для иностранных студентов форме.

В результате изучения материала модуля студенты должны *уметь* использовать методы экспериментальных и теоретических исследований электродинамики, формулировать основные законы электромагнетизма и положения квантовой теории, свободно владеть физической терминологией, использовать полученные знания для решения практических задач.

Необходимо *понимать*, что электрические и магнитные явления тесно связаны между собой.

1. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

1.1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ

Вещества состоят из молекул, молекулы – из атомов, атомы из элементарных частиц.

Элементарные частицы — это мельчайшие частицы атома. Сейчас их обнаружено больше двухсот. Масса и заряд частицы — основные свойства элементарных частиц. Заряд частицы характеризует её способность к электрическим и магнитным взаимодействиям. Нельзя отделить заряд от частицы. Электрический заряд не существует сам без частицы.

Атом состоит из трех основных видов элементарных частиц: электронов, протонов, нейтронов.

Электрон имеет массу $9,1 \cdot 10^{-28}$ г, его заряд принято условно считать отрицательным, он наименьший в природе.

Протон имеет массу $1,67 \cdot 10^{-24}$ г (в 1837 раз больше, чем масса электрона). Заряд протона равен по величине заряду электрона, но противоположен по знаку. Заряд протона — это элементарный положительный заряд.

Нейтрон — элементарная частица, его масса немного больше массы протона. Нейтрон не имеет заряда, т.е. он электронейтрален.

Упрощённую модель атома даёт нам планетарная модель. Согласно этой модели атома в центре его находится положительно заряженное ядро, а вокруг него вращаются электроны. Диаметр ядра атома 10^{-14} м, диаметр атома 10^{-9} м. Ядро состоит из частиц протонов и нейтронов.

Электрические явления объясняет электронная теория. По этой теории электрические и магнитные явления зависят от движения электронов, их взаимодействия между собой и другими заряженными частицами.

В разных атомах количество электронов разное. Количество электронов в атоме равно количеству протонов. Значит, сумма элементарных зарядов ядра равна сумме отрицательных зарядов электронов. Атом в целом электронейтрален — не имеет электрического заряда (рис. 1.1, а). Электроны и атомное ядро заряжены проти-

воположным по знаку зарядом. Электроны притягиваются к ядру, сила их электрического притяжения зависит от вида вещества.

Атомы могут терять или присоединять к себе один или несколько электронов. Если атом потерял один или несколько электронов, сумма положительных зарядов будет больше суммы отрицательных зарядов. Атом становится положительным ионом (рис. 1.1, б). И, наоборот, если атом присоединяет один или несколько электронов, он становится отрицательно заряженным ионом (рис. 1.1, в).

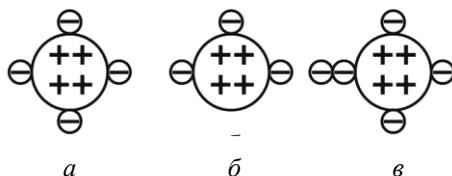


Рис. 1.1. Упрощённые схемы:

а — нейтральный атом; *б* — положительный ион; *в* — отрицательный ион

Ионизация — это процесс образования ионов.

Электроны, которые отделились от атомов, могут беспорядочно двигаться внутри вещества. Это *свободные электроны*. Заряды, которые связаны с атомами, называются *связанными*. Свободные электроны есть в металлах. Электроны, входящие в состав атома и движущиеся только внутри него, называются *связанными*.

Обратите внимание!

1. Планетарная модель даёт элементарные представления о строении атома. Опыты по изучению строения атома проводил в начале XX века английский учёный Резерфорд (1871—1937). Он предложил модель строения атома.

2. Электрон имеет элементарный отрицательный заряд.

3. Заряд частицы характеризует её способность к электрическим и магнитным взаимодействиям.

4. Ядро состоит из частиц — протонов и нейтронов.

5. Электроны и атомное ядро заряжены противоположным по знаку зарядом.

6. Процесс образования ионов называется ионизацией.

Слова и словосочетания

планетарная модель	присоединять
электронная теория	ионизация
электронейтрален	свободные заряды
терять, потерять	связанные заряды
беспорядочно	противоположный

 *Это интересно!*

Уильям Гильберт (1544 – 1603) — английский физик и врач. Основоположник науки об электричестве. Верный экспериментальному методу, провёл множество опытов по обнаружению электрических свойств различных тел. Обогастил эту область рядом открытий и приборов. Исследовал магнитные явления, установил, что Земля — большой магнит. Был первым сторонником идей гелиоцентрической системы Коперника в Англии.

Американский физик Бенджамин Франклин, занимавшийся исследованиями электрических явлений, назвал два вида зарядов положительными и отрицательными. Эти названия являются условными. Термины «положительные» и «отрицательные» по отношению к зарядам имеют не тот смысл, который вкладывается в понятие положительного и отрицательного числа. В процессе переноса заряда от одного тела к другому может получиться так, что какое-то тело будет нести определённый заряд, а другое — заряд той же величины, но противоположный по знаку.

Упражнение 1.1

1. Какие элементарные частицы входят в состав ядра?
2. Объясните планетарную модель атома.
3. Что такое положительный и отрицательный ион?
4. Что такое ионизация?
5. Какие электроны называются свободными?
6. От атома водорода отделился электрон. Как называется оставшаяся частица? Какой заряд этой частицы?
7. Атом кислорода присоединил два электрона. Как называется образовавшаяся частица? Какой она имеет заряд?
8. В ядре атома железа 82 частицы. Вокруг ядра движется 26 электронов. Сколько в ядре этого атома протонов и нейтронов?

1.2. ПРОВОДНИКИ, ДИЭЛЕКТРИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ

Вещества, которые существуют в природе, можно условно разделить на три группы: проводники, диэлектрики (изоляторы), полупроводники.

Проводники — это вещества, которые имеют много свободных зарядов. Проводниками могут быть твёрдые тела, жидкости и газы в ионизированном состоянии.

Проводники первого рода — это металлы, уголь, некоторые химические соединения. Если по таким проводникам проходит электрический ток, то в них нет выделения вещества.

Расстояние между атомами в металлах очень мало, поэтому внешние электронные орбиты соседних атомов перекрываются. Электроны, которые были на этих орбитах, уже нельзя отнести к одному атому. Они теряют связь с ядрами своих атомов и становятся свободными электронами. А атомы, которые потеряли электроны, становятся положительными ионами. Особенностью металлов является очень большое число свободных электронов в единице объёма (10^{28} — 10^{29} электронов в кубическом метре).

Проводники второго рода — это электролиты (водные растворы солей, кислот, щелочей, расплавленные соли). При прохождении электрического тока в них выделяется химическое составное вещество.

Известно, что молекула соли, кислоты или щёлочи состоит из положительно или отрицательно заряженных ионов, которые притягиваются друг к другу. При беспорядочном тепловом движении в воде молекулы соли, щёлочи и кислоты сталкиваются между собой и с молекулами воды. В результате этих столкновений они распадаются на отдельные разноимённо заряженные ионы. Ионы в электролите находятся в тепловом беспорядочном движении.

Диэлектрики — это вещества, в которых нет (или почти нет свободных зарядов). Диэлектриками могут быть твёрдые тела (эбонит, фарфор, стекло, янтарь, резина), жидкости (различные масла, дистиллированная вода), все газы в неионизированном состоянии.

Внутри атомов и молекул диэлектриков положительно заряженные ядра и отрицательно заряженные электроны связаны между собой при обычных температурах. Связанные электроны без затраты энергии покинуть молекулы или атомы не могут. Они могут

только смещаться на малые расстояния в пределах одной молекулы.

Полупроводники — это вещества, которые по своим электропроводящим свойствам занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Германий, селен, кремний при комнатной температуре слабо проводят электрические заряды, так как в них очень мало свободных электронов.

При повышении температуры, при освещении светом и облучении рентгеновским излучением в полупроводниках повышается концентрация свободных электронов и полупроводники начинают лучше проводить электрические заряды.

Обратите внимание!

1. Среди наиболее распространённых твёрдых проводников известны металлы, полуметаллы, углерод (в виде угля и графита). Пример проводящих жидкостей — электролиты. Пример проводящих газов — ионизированный газ (плазма).

2. В проводниках валентные электроны способны довольно легко перемещаться. При металлическом типе связи каждый электрон одновременно притягивается к нескольким атомным ядрам и приобретает некоторую свободу перемещения, в отличие от других типов связи.

2. К диэлектрикам относятся воздух и другие газы, стекло, различные смолы, пластмассы непременно сухие. Химически чистая вода также является диэлектриком.

3. Полупроводники — вещества, которые по своей удельной проводимости занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличаются от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и различных видов излучения.



Это интересно!

Луиджи Гальвани (1737 – 1798) — итальянский физик и физиолог. Один из основоположников учения об электричестве, обнаруживший сокращение мышц лягушки под действием электрического тока. Его опыты с «животным» электричеством легли в фундамент нового научного направления — электрофизиологии.

Заряды электрона и протона равны по величине. Протон принято считать положительно заряженной частицей, а электрон — отрицательно заряженной. Электроны способны почти свободно двигаться в проводниках, в то время как протоны остаются связанными в атомных ядрах. Как положительные, так и отрицательные ионы могут легко перемещаться в растворах.

Если в изолированном проводнике есть хотя бы один лишний электрон, проводник будет отрицательно заряжен. От того, сколько электронов лишние, зависит величина заряда, но его знак остаётся тем же.

Полупроводники — это кристаллики твёрдых веществ, например, кремния, обладающих особыми электрическими свойствами. На их проводимость оказывает влияние температура и облучение светом. А самое интересное, что их способность проводить электрический ток можно менять вкраплением примесей разных химических веществ. Это свойство полупроводников обеспечило им широкое применение в электротехнике, радиоприборах и электронике.

Слова и словосочетания

проводник	резина
полупроводник	германий
диэлектрик	проводить
эбонит	селен
фарфор	кремний
янтарь	промежуточное положение
стекло	концентрация
облучение	рентген

Упражнение 1.2

1. На какие три группы можно разделить все вещества?
2. Какие вещества называются проводниками?
3. Привести примеры проводников первого и второго рода.
4. Что называется диэлектриками?
5. Какие вещества называются полупроводниками?
6. Как можно повысить концентрацию свободных электронов в полупроводниках?

1.3. ВИДЫ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ

Сообщение телу какого-либо (положительного или отрицательного) заряда называется *электризацией*.

Существуют четыре вида электризации: электризация трением; электризация при контакте; электризация через влияние; электризация под действием света (фотоэффект).

Если потереть эбонитовую палочку о шерсть (или сукно), то она наэлектризуется, т.е. получит дополнительный заряд. Заряд на эбонитовой палочке будет отрицательным. Наличие заряда на палочке можно проверить так. Поднесём наэлектризованную эбонитовую палочку к лёгким бумажкам или бумажному султанчику. Они притянутся к палочке.

Аналогичным способом можно наэлектризовать стеклянную палочку при трении её о бумагу, капрон. Заряд на стеклянной палочке будет положительным.

Если прикоснуться заряженной эбонитовой или стеклянной палочкой к султанчику, то он тоже зарядится, т.е. получит заряд при контакте.

Два тела одного и того же вещества при трении никогда не электризуются. При трении двух тел из разнородных веществ происходит их электризация. При электризации важен тесный контакт между телами из разнородных веществ. При таком контакте часть электронов от одного тела переходит к другому. Оба тела электризуются равным по величине и противоположным по знаку зарядом — положительным или отрицательным.

Зарядить тело по индукции можно так. Поднесём близко к электроскопу заряженную эбонитовую палочку. Листики электроскопа разойдутся. Они зарядились. Если палочку уберём, листики опадут, т.е. электризация исчезнет. Это можно объяснить тем, что под влиянием отрицательно заряженной палочки свободные электроны верхнего конца стержня электроскопа уходят вниз на листики. Листики получают дополнительный отрицательный заряд и расходятся (они отталкиваются друг от друга). Когда уберём эбонитовую палочку, «лишние» электроны с листиков возвращаются вверх. Электроскоп становится электрически нейтральным.

Проводники могут заряжаться и под действием света. Под действием света электроны могут вылетать из проводника в окру-

жающее пространство, поэтому проводник заряжается положительно. Это явление называется фотоэлектрическим эффектом (*фотоэффектом*). Возникновение зарядов под действием света можно наблюдать на простейшем опыте (рис. 1.2). Зарядим электроскоп отрицательным зарядом.

Пластина (лучше цинковая) тоже будет иметь отрицательный заряд. Осветим цинковую пластину дуговой лампой. Листочки электроскопа немедленно опадут. Это значит, что пластина теряет свои избыточные электроны, которые под действием света вырываются за пределы металла.

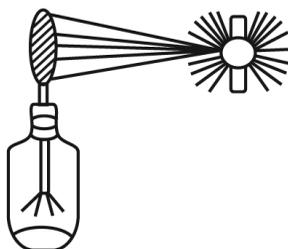


Рис. 1.2. Нейтрализация электрических зарядов на пластине под действием света

Если повторить этот опыт с положительно заряженной пластиной, то такого эффекта не будет. Положительные заряды связаны с металлом более прочно. Под действием света могут освободиться только отрицательные заряды — электроны.

Во всех видах электризации заряды не возникают из ничего и не исчезают. Они только перераспределяются между телами, переходя с одного тела на другое. При этом переносятся с одного тела на другое только электроны. Суммарный заряд тел, между которыми перераспределяются заряды, не изменяется. Это значит, что выполняется закон сохранения электрического заряда.

Обратите внимание!

1. Электронейтральные тела можно зарядить, т.е. сообщить им положительный или отрицательный заряд.
2. Явление электризации можно объяснить на основании электронной теории.

3. При всех явлениях, связанных с перераспределением электрических зарядов в изолированной системе тел, алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной.

4. Если при соприкосновении двух тел некоторые электроны переместятся с поверхности одного тела на другое, то происходит электризация. Тело, на котором электронов будет больше, чем протонов, зарядится отрицательно. Тело, на котором электронов меньше, чем протонов, зарядится положительно.

5. Алгебраическая сумма электрических зарядов изолированной системы тел не изменяется.

Слова и словосочетания

тереть, потереть	фотоэффект
дополнительный заряд	пластина
прикасаться, прикоснуться	дуговая лампа
влияние	вырываться
расходиться, расходятся	капрон
лишний	наличие



Это интересно!

Бенджамин Франклин (1706 – 1790) — американский физик и политический деятель. Основные научные исследования проводил в области электричества. Объяснил действие «лейденской банки», построил первый плоский конденсатор, изобрёл молниеотвод, доказал электрическую природу молнии. Применил электрическую искру для взрыва пороха. Разработал теорию электрических явлений, в которой содержался закон сохранения заряда.

Во время движения воздушных потоков из-за трения происходит разделение электрических зарядов и накопление их в облаках и на поверхности Земли. Достигая большой величины, эти заряды способны пробить воздух, что приводит к гигантской искре — молнии. Защитой от молнии служит заземление, которое способствует распределению энергии молнии в земле и обеспечивает безопасный режим работы электросетей.

Человеческое тело хорошо проводит электричество. Поэтому если прикоснуться рукой к заряженному предмету, то электроны свободно стекут с поверхности заряженного тела в руку.

Упражнение 1.3

1. Какие виды электризации вы знаете?
2. Почему при трении разнородные тела электризуются, а однородные — не электризуются?
3. Почему при электризации трением оба тела заряжаются одинаковым по величине, но противоположным по знаку зарядом?
4. В чём заключается явление фотоэффекта?
5. Как можно зарядить тело по индукции?
6. При помощи электронной теории объясните электризацию тел трением.

1.4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ. ЗАКОН КУЛОНА

Вокруг заряженного тела существует электрическое поле. Одно заряженное тело действует на другое заряженное тело при помощи электрического поля. Одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Если зарядим два бумажных султанчика разноименными зарядами (один от заряженной эбонитовой палочки, другой от заряженной стеклянной палочки) и приблизим их друг к другу, листики султанчиков притянутся друг к другу. Зарядим эти султанчики от одной какой-то палочки, например, от заряженной стеклянной. Листики оттолкнутся друг от друга; они разойдутся в противоположные стороны.

Если заряженное тело имеет достаточно малые размеры по сравнению с расстоянием до других зарядов, то это тело называют *точечным зарядом*.

Французский физик Кулон в 1785 г. открыл основной закон электростатики (закон Кулона): *сила взаимодействия между двумя неподвижными точечными зарядами прямо пропорциональна величинам зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами и направлена вдоль прямой, которая соединяет эти заряды*.

$$F_0 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.1)$$

где F_0 — сила взаимодействия между зарядами; k — коэффициент пропорциональности, который зависит от выбора единиц изме-

рения физических величин и от среды, в которой находятся заряды; q_1 и q_2 — величины зарядов; r — расстояние между зарядами.

В СИ коэффициент пропорциональности $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$, где ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \left(\frac{\Phi}{\text{м}} \right).$$

С учётом коэффициента k формулу (1.1) можно переписать

$$F_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (1.2)$$

Формула (1.2) выражает закон Кулона для зарядов, которые находятся в вакууме. Сила взаимодействия между зарядами, которые находятся в какой-то среде, меньше чем в вакууме, поэтому формулу (1.2) для среды можно записать

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad \text{или} \quad F = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.3)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, величина безразмерная; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды: $\epsilon_a = \epsilon \epsilon_0$.

Диэлектрические постоянные ϵ некоторых веществ приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Вещество	ϵ	Вещество	ϵ
Вода (чистая)	81	Стекло	4 – 7
Воздух	1,0006	Керосин	2,1
Керамика	до 80	Масло трансформаторное	2 – 2,5
Слюда	6 – 8	Эбонит	4 – 4,5

Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в вакууме больше, чем в данной среде.

Силы взаимодействия одноимённых зарядов равны по величине и направлены в противоположные стороны $\vec{F} = -\vec{F}_2$ (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Силы взаимодействия одноимённых зарядов

Направление сил взаимодействия разноимённых зарядов показано на рис. 1.4.



Рис. 1.4. Силы взаимодействия разноимённых зарядов

Закон Кулона (1.2, 1.3) справедлив для точечных зарядов, для элементарных частиц, если расстояние между частицами порядка 10^{-13} см и для тел сферической формы.

Если зарядов больше двух и надо найти силу, с которой другие заряды действуют на них, то можно применить принцип суперпозиции. В этом случае наблюдается принцип независимости действия сил или *принцип суперпозиции*: каждый заряд действует на другой заряд независимо от наличия других зарядов. Взаимодействие между двумя частицами не изменяется при внесении третьей частицы, также взаимодействующей с первыми двумя. Например, найдём силы, которые действуют на заряд q_3 (рис. 1.5). На заряд q_3 действуют силы \vec{F}_{32} и \vec{F}_{31} со стороны зарядов q_1 и q_2 . Значит, результирующая сила \vec{F} , действующая на заряд q_3 , равна сумме этих двух сил.

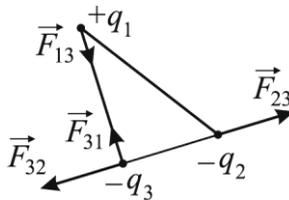


Рис. 1.5. Принцип суперпозиции

Единица заряда в СИ — Кулон: $[q] = 1 \text{ Кл}$. Кулон является единицей, определяемой через основную единицу ампер (А). Это заряд, который прошёл через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока в проводнике один ампер:

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

В обычных лабораторных опытах для обнаружения и измерения электрических зарядов используется *электрометр* — прибор, состоящий из металлического стержня и стрелки, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 1.6). Стержень со стрелкой изолирован от металлического корпуса. При соприкосновении заряженного тела со стержнем электрометра, электрические заряды одного знака распределяются по стержню и стрелке. Силы электрического отталкивания вызывают поворот стрелки на некоторый угол, по которому можно судить о заряде, переданном стержню электрометра. Электрометр является достаточно грубым прибором, он не позволяет исследовать силы взаимодействия зарядов.

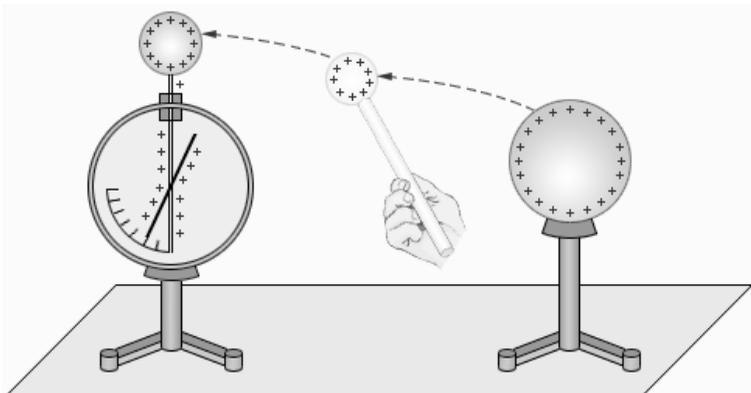


Рис. 1.6. Перенос заряда с заряженного тела на электрометр

Методические указания по решению задач

Решая задачи целесообразно использовать следующие методические указания:

1) вникнув в условие задачи, сделать краткую запись условия, выразить все данные в СИ и, где это только возможно, сделать

схематичный чертеж или рисунок, поясняющий содержание задачи;

2) выяснив, какие физические законы лежат в основе данной задачи, решить ее в общем виде, т.е. выразить искомую физическую величину через заданные в задаче величины (в буквенных обозначениях, без подстановки числовых значений в промежуточные формулы);

3) проверив правильность общего решения, подставить числа в окончательную формулу и указать единицу искомой величины, проверив правильность ее размерности. Проверить достоверность ответа.

Примеры решения задач с использованием формулы закона Кулона

Задача 1. Два одинаковых по величине и знаку точечных заряда находятся на расстоянии 3 м друг от друга в керосине и взаимодействуют с силой 0,2 Н, $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}$. Определить величину

каждого заряда.

Дано:

$$q_1 = q_2 = q$$

$$r = 3 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 2$$

$$F = 0,2$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$q = ?$$

Решение:

Для случая, когда взаимодействующие заряды равны, закон Кулона можно записать

$$\text{так: } F = k \frac{q^2}{\varepsilon r^2}, \text{ отсюда } q = \sqrt{\frac{F \varepsilon r^2}{k}} = r \sqrt{\frac{F \varepsilon}{k}}.$$

Подставляем числовые значения:

$$q = 3 \sqrt{\frac{0,2 \cdot 2}{9 \cdot 10^9}} = 0,2 \cdot 10^{-5} \text{ (Кл)}.$$

Ответ: величина взаимодействующих зарядов равна $0,2 \cdot 10^{-5}$ Кл.

Задача 2. Два одинаковых радиусов шарика с зарядами $q_1 = -1,5 \cdot 10^{-5}$ Кл и $q_2 = 2,5 \cdot 10^{-5}$ Кл находятся в воздухе, притягиваются и прикасаются, потом отталкиваются на 5 см. Определить заряд каждого шарика после прикосновения и силу электрического взаимодействия между ними.

Дано:

$$q_1 = -1,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$$

$$r = 5 \text{ см}$$

$$\varepsilon = 1$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Нм}^2}{\text{Кл}^2}$$

$$q \text{ — ? } F \text{ — ?}$$

Решение:

Вследствие того, что шары имеют одинаковые размеры, по закону сохранения зарядов можно записать:

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}, \text{ где } q = q'_1 = q'_2; \text{ } q'_1 \text{ и } q'_2 \text{ —}$$

новые заряды на шариках, появившиеся после их прикосновения.

$$q = \frac{-1,5 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-5}}{2} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ (Кл)}.$$

После соприкосновения новые заряды на шарах будут иметь одинаковую величину и знак (положительный) $q = 0,5 \cdot 10^{-5}$ Кл, поэтому шарики отталкиваются и расходятся на расстояние $r = 0,05$ м. Силу их взаимодействия на расстоянии r определяем по закону Кулона:

$$F = k \frac{q^2}{\varepsilon r^2}; \quad F = \frac{9 \cdot 10^9 (0,5 \cdot 10^{-5})^2}{(0,05)^2} = 90 \text{ (Н)}.$$

Ответ: заряд каждого шарика равен $0,5 \cdot 10^{-5}$ Кл, сила их электрического взаимодействия равна 90 Н.

Задача 3. Два заряда, один из которых в 3 раза меньше другого, находятся в вакууме на расстоянии 0,3 м и взаимодействуют с силой 30 Н. Определить величины зарядов. На каком расстоянии в воде эти заряды будут взаимодействовать с той же силой?

Дано:

$$q_1 = q$$

$$q_2 = 3q$$

$$r_1 = 0,3 \text{ м}$$

$$\varepsilon_1 = 1$$

$$\varepsilon_2 = 81$$

$$F_1 = F_2 = 30 \text{ Н}$$

$$q_1 \text{ — ? } q_2 \text{ — ? } r_2 \text{ — ?}$$

Решение:

Запишем закон Кулона для взаимодействующих зарядов q и $3q$ в вакууме

$$F_1 = \frac{kq3q}{\varepsilon_1 r_1^2} \text{ или } F_1 = \frac{3kq^2}{\varepsilon_1 r_1^2}.$$

Отсюда определяем q :

$$q = \sqrt{\frac{\varepsilon_1 r_1^2 F_1}{3k}} = r_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_1 F_1}{3k}}.$$

Подставляем числовые значения:

$$q = 0,3 \sqrt{\frac{30 \cdot 1}{3 \cdot 9 \cdot 10^9}} = 10^{-5} \text{ (Кл)}.$$

Следовательно, $q_1 = 10^{-5}$ Кл, $q_2 = 3 \cdot 10^{-5}$ Кл.

Запишем закон взаимодействия этих зарядов на расстоянии r_2

в воде: $F_2 = \frac{kq_1q_2}{\varepsilon_2 r_2^2}$ или $F_2 = \frac{3kq^2}{\varepsilon_2 r_2^2}$,

отсюда $r_2 = \sqrt{\frac{3kq^2}{\varepsilon_2 F_2}} = q \sqrt{\frac{3k}{\varepsilon_2 F_2}}$.

Подставляем числовые значения $r_2 = 10^{-5} \sqrt{\frac{3 \cdot 9 \cdot 10^9}{81 \cdot 30}} = 0,06 \text{ (м)}$.

Ответ: первый заряд равен 10^{-5} Кл, второй равен $3 \cdot 10^{-5}$ Кл, расстояние между зарядами в воде равно 0,06 м.

Обратите внимание!

1. Существует два рода электрических зарядов, условно названных положительными и отрицательными.

2. Заряды могут передаваться (например, при непосредственном контакте) от одного тела к другому. В отличие от массы тела электрический заряд не является неотъемлемой характеристикой данного тела. Одно и то же тело в разных условиях может иметь разный заряд.

3. Одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые — притягиваются. В этом также проявляется принципиальное отличие электромагнитных сил от гравитационных. Гравитационные силы всегда являются силами притяжения.

4. В изолированной системе алгебраическая сумма зарядов всех тел остаётся постоянной.

5. Впервые закон взаимодействия неподвижных зарядов был установлен французским физиком Ш. Кулоном (1785 г.).

6. Если заряженное тело взаимодействует одновременно с несколькими заряженными телами, то результирующая сила, действующая на данное тело, равна векторной сумме сил, действующих на это тело со стороны всех других заряженных тел.

7. Практически закон Кулона хорошо выполняется, если размеры заряженных тел много меньше расстояния между ними.

8. Для нахождения силы взаимодействия электрических зарядов используют модель точечного заряда — абстрактное понятие, заменяющее реальный объект и обладающее с ним большой общностью, которая является результатом выделения главных свойств изучаемых явлений и отвлечения от второстепенных.

Слова и словосочетания

одноимённые	принцип суперпозиции
разноимённые	разводить в стороны
точечный заряд	свет
среда (для зарядов)	практика
диэлектрическая проницаемость	поперечное сечение
приближать	заряженное тело
коэффициент пропорциональности	электрометр
контакт	производная единица
основной закон	пропорциональный

 *Это интересно!*

Шарль Кулон (1736 – 1806) — французский физик и военный инженер. Сформулировал закон трения. Построил крутильные весы — чувствительный прибор, с помощью которого установил основной закон электричества (закон Кулона). Занимался исследованием упругих свойств тел и магнитных явлений.

Чувствительным прибором для обнаружения электростатического заряда является электроскоп с лепестками, сделанными из золота или алюминиевой фольги. Он устроен из металлического шара, прикрепленного к металлическому стержню, на противоположном конце которого закреплены два лепестка. Лепестки незаряженного электроскопа, несущие равные количества положительного и отрицательного заряда, а потому электрически нейтральные, свободно висят. Электроскоп показывает, когда шару передаётся заряд, сразу же распространяющийся на все металлические элементы, в том числе лепестки. При этом лепестки расходятся.

Сердцевина стволов и ветвей некоторых деревьев представляет собой пористую клеточную ткань. Это очень лёгкий и сухой

пористый материал. Иногда делают электроскоп, состоящий из шарика, сделанного из такого материала. С помощью подобного электроскопа можно померить силу отталкивания, действующую между двумя одноимённо заряженными шариками. Оказывается, эта сила меняется с расстоянием подобно силе тяготения, только её источником являются заряды. Сила взаимодействия точечных зарядов называется кулоновской силой.

Есть ещё один тип электроскопа, состоящего из небольшого шарика, сделанного из древесины или пенопласта и подвешенного на тонкой изолирующей нити. Прикоснувшись к шарiku заряженным диэлектриком, можно передать ему некоторый заряд. Если поднести к такому электроскопу заряженное одноимённым зарядом тело, шарик заметно оттолкнётся от него и отклонится. Если поднести к шарiku тело с противоположным знаком заряда, шарик резко отклонится в его сторону. Это значит, что по поведению заряженного шарика электроскопа можно определить знак заряда поднесённого к нему тела: шарик притянется к заряженному телу, если заряды разноимённые, и оттолкнётся от него, если заряды одноимённые.

Упражнение 1.4

1. Сформулировать закон Кулона.
2. В чём заключается принцип суперпозиции?
3. Какая единица заряда в системе СИ?
4. В каких случаях справедлив закон Кулона?
5. Можно ли создать или уничтожить заряд? Объяснить сущность закона сохранения заряда.

5. Два точечных заряда находятся в воздухе ($\epsilon_v = 1$) на расстоянии $r = 20$ см друг от друга и взаимодействуют с некоторой силой. Во сколько раз изменится расстояние между зарядами, если они будут находиться в спирте ($\epsilon_c = 25$)? (Ответ: в 5 раз уменьшится).

6. Шарик ($q_1 = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл и $q_2 = -2,8 \cdot 10^{-6}$ Кл) приведены в контакт, а затем разведены на расстояние $r = 10^{-5}$ см. Найдите силу взаимодействия между ними. (Ответ: 1,44 Н).

7. Определить количество лишних электронов на каждом заряженном шарике, если два шарика находятся на расстоянии 2 мм

друг от друга и отталкиваются с силой $2 \cdot 10^{-5}$ Н. Заряды на шариках одинаковые. (Ответ: $6 \cdot 10^9$ электронов).

8. Два заряда ($q_1 = 6 \cdot 10^{-7}$ Кл и $q_2 = -4 \cdot 10^{-7}$ Кл) находятся на расстоянии 20 см друг от друга. Найти точку на линии, которая соединяет эти заряды, и в которой третий заряд q_3 находится в равновесии. (Ответ: 0,1 м).

9. На нити висит маленький шарик массой 200 мг. Шарик имеет заряд $1,7 \cdot 10^{-8}$ Кл. Снизу к шарiku подносят одноимённый и равный ему заряд. На каком расстоянии надо поместить второй заряд, чтобы система находилась в равновесии? (Ответ: 3,6 см).

10. Два металлических шарика диаметром $D = 5$ см каждый находятся в трансформаторном масле ($\epsilon = 2,2$). Расстояние между их центрами $r = 50$ см. Определить с какой поверхностной плотностью заряжены шарики, если они взаимодействуют с силой $F = 2,2$ мН. (Ответ: $4,7 \cdot 10^5$ Кл/м²).

11. Два точечных заряда $q_1 = q_2 = -3 \cdot 10^{-7}$ Кл висят на нитях длиной $l = 1$ м в керосине. Нити закреплены в одной точке. Заряды разошлись на расстояние $r = 40$ см. Определить силу натяжения нитей. (Ответ: $1,2 \cdot 10^{-2}$ Н).

1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЁННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Один заряд на другой действует при помощи электрического поля. Как и гравитационное поле, электрическое поле существует реально. Поле — это один из видов материи. Частицы и поле — два вида материи, известные современной физике. Представление о существовании в природе особого вида материи — переменных электрических и магнитных полей — впервые обосновал М Фарадей (1791—1867).

В пространстве вокруг любого заряда всегда есть поле, созданное этим зарядом. Электрическое поле неподвижного заряда называется *электростатическим*. Это поле действует с некоторой силой на заряды. Силовой характеристикой поля является *напряжённость*.

В какой-то точке пространства поместим тело с зарядом q . Исследуем поле заряда (рис. 1.7).

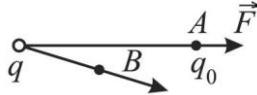


Рис. 1.7. Сила \vec{F} , действующая на пробный заряд в точке A

Для этого будем помещать в точку A поочерёдно маленькие заряды (они называются пробными) q_0, q_0', q_0'' и т.д. Измеряя силы, действующие на эти заряды, F, F', F'' получим разные значения, но отношение сил к величинам пробных зарядов для данной точки A оказывается величиной постоянной.

$$\frac{F}{q_0} = \frac{F'}{q_0'} = \frac{F''}{q_0''} = \text{const.}$$

Значит, отношение F/q_0 является характеристикой точки A электрического поля. Это отношение называется *напряжённостью* и обозначается буквой « E »

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

Аналогично можно, получить напряжённость точки B .

Напряжённость электрического поля — это сила, с которой поле действует на единичный пробный заряд, помещённый в данную точку поля.

Сила \vec{F} — величина векторная, заряд q — скаляр. Напряжённость — тоже векторная величина, её направление совпадает с направлением силы, действующей на положительный заряд, помещённый в данную точку.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1.4)$$

Единица напряжённости в СИ — ньютон на кулон: $[E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$,

или вольт на метр $(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = \frac{\text{В}}{\text{м}})$.

Графически напряжённость поля точечного заряда изобразим при помощи силовых линий (силовые линии существуют условно). Направление силовых линий выберем так: силовые линии выходят из положительного заряда и заканчиваются в бесконечности (рис. 1.8).

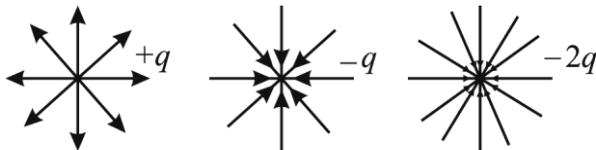


Рис. 1.8. Графическое изображение полей

Поместим в некоторую точку A на расстоянии r (см. рис. 1.7) от заряда q пробный заряд q_0 . По закону Кулона сила F , действующая на заряд, $F = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$. Подставим это выражение в формулу (1.4), тогда напряжённость поля точечного заряда в некоторой точке $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$.

Если поле создано несколькими зарядами, то результирующую напряжённость найдём методом суперпозиции (рис. 1.9).

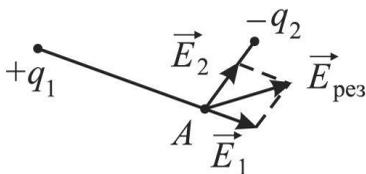


Рис. 1.9. Метод суперпозиции

Следовательно, напряжённость в данной точке поля системы точечных зарядов равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых в этой точке каждым зарядом в отдельности. Физическая сущность суперпозиции полей состоит в том, что в совокупности зарядов q_1, q_2, \dots, q_n каждый отдельный заряд создаёт собственное поле электрическое поле, напряжённость которого не зави-

сит от наличия полей, образованных другими зарядами. В каждой точке электростатического поля происходит независимое наложение полей, создаваемых отдельными зарядами. Использование принципа суперпозиции упрощает решение многих теоретических и практических задач по электростатике.

В зависимости от значения напряжённости различают однородное и неоднородное электрические поля (рис. 1.10, 1.11). Напряжённость в разных точках неоднородного поля не одинакова. В однородном поле в разных точках между заряженными пластинами напряжённость одинаковая.

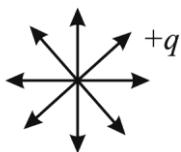


Рис. 1.10. Неоднородное поле

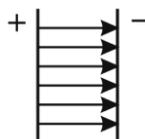


Рис. 1.11. Однородное поле

Напряжённость поля бесконечной равномерно заряженной плоскости $E = \frac{\delta}{2\epsilon_0}$, где δ — поверхностная плотность заряда:

$$\delta = \frac{q}{S}.$$

Напряжённость поля между двумя разноименно заряженными параллельными бесконечными плоскостями

$$E = \frac{\delta}{\epsilon_0}.$$

Напряжённость поля шара с зарядом q в точке вне шара, удалённой на расстояние r от центра шара $E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$. Т.е. она равна напряжённости поля точечного заряда q , расположенного в центре шара.

Обратите внимание!

1. По современным представлениям, электрические заряды не действуют друг на друга непосредственно. Каждое заряженное тело создаёт в окружающем пространстве электрическое поле. Это поле оказывает силовое действие на другие заряженные тела.

2. Главное свойство электрического поля — действие на электрические заряды с некоторой силой. Взаимодействие заряженных тел осуществляется не непосредственным их воздействием друг на друга, а через электрические поля, окружающие заряженные тела.

3. Электрическое поле для наглядности описания изображают графически с помощью силовых линий, система которых представляет собой физическую модель.

4. Напряжённость электрического поля, создаваемого системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей, создаваемых в той же точке зарядами в отдельности. Это свойство электрического поля означает, что поле подчиняется принципу суперпозиции.

5. Система линий напряжённости — это физическая модель для описания свойства электрического поля.

6. При изображении электрического поля с помощью силовых линий их густота должна быть пропорциональна модулю вектора напряженности поля. Густота силовых линий служит относительной мерой напряжённости поля.

Слова и словосочетания

напряжённость	условиться
помещать, поместить	однородное поле
исследовать	неоднородное тело
пробный заряд	аналогично
единичный	бесконечность
силовые линии	плоскость
условно	

 *Это интересно!*

Алессандро Вольты (1745 – 1827) — итальянский физик и химик. Под влиянием наблюдений Гальвани занялся исследованием электрического тока. Изобрёл и построил первый длительно действующий источник тока — вольты столб. Это устройство проторило дорогу дальнейшему экспериментальному изучению электричества. Автор многих приборов и проекта телеграфа.

Всю жизнь человека окружают естественные атмосферные электрические поля. Наиболее ярко проявляет электрическое поле себя в грозу. Тогда напряженность у земли достигает 10 кВ/м (киловольт на метр). Но и в безоблачную погоду атмосферное поле имеет силу в среднем 130 В/м. Зависит эта величина и от географического положения: максимальна сила электрического поля в умеренных широтах, минимальна — на полюсах и у экватора. Но все эти изменения воспринимаются организмом как должное.

Благодаря активной научно-технической деятельности, особенно в последние десятилетия, человек принёс свои коррективы в окружающую нас атмосферу. Уровень напряжённости электрического поля возрос и в некоторых местах стал уже небезразличен живому организму.

Особенно сильное воздействие на здоровье оказывает электрическое поле там, где есть высоковольтные линии электропередач (ЛЭП). Напряжённость электрического поля непосредственно под ЛЭП достигает порой десятков киловольт на метр.

По мнению учёных, основной механизм биологического воздействия электрического поля — появление в организме «токов смещения». Так называется движение электрически заряженных частиц.

Учёными установлена потенциальная опасность пребывания человека в электрическом поле, напряжённость которого превышает 25 кВ/м. Здесь можно работать только с применением средств индивидуальной защиты.

Безопасный уровень напряжённости электрического поля в жилых зданиях 0,5 кВ/м.

Упражнение 1.5

1. Назвать два вида материи.
2. Что называется электростатическим полем?
3. Что называется напряжённостью электрического поля?
4. Как направлен вектор напряжённости?
5. Какая единица напряжённости в СИ?
6. Записать формулу напряжённости электростатического поля точечного заряда на расстоянии r от него.

7. Напряжённость электростатического поля заряда, помещённого в керосин, в некоторой точке равна E_k . Как изменится напряжённость поля в этой точке, если заряд поместить в воду? (Ответ: в 40,5 раз).

8. Напряжённость электрического поля Земли у поверхности равна 1 Н/Кл. С какой силой это поле действует на заряд $0,5 \cdot 10^{-7}$ Кл? (Ответ: $0,5 \cdot 10^{-7}$ Н).

9. Заряд q создаёт электрическое поле. В точке A на расстоянии 10 см от заряда q находится заряд $q_1 = 0,5 \cdot 10^{-8}$ Кл. На заряд q_1 поле действует силой $3 \cdot 10^{-4}$ Н. Найти напряжённость поля в точке A . Определите величину заряда. (Ответ: $0,7 \cdot 10^{-7}$ Кл).

10. Два одноимённых точечных заряда $q_1 = 2,7 \cdot 10^{-7}$ Кл и $q_2 = 1,7 \cdot 10^{-7}$ Кл находятся на расстоянии 20 см друг от друга. Определить в какой точке на прямой, соединяющей заряды, напряжённость поля равна 0. (Ответ: 9 см).

11. Точечный заряд в керосине ($\epsilon = 2$) на расстоянии $r = 2$ м создаёт поле, напряжённость которого $E = 9$ В/м. Определить заряд q . (Ответ: 7,98 нКл).

12. Заряд $q_1 = 1,3 \cdot 10^{-9}$ Кл в керосине ($\epsilon = 2$) на расстоянии $r = 5 \cdot 10^{-3}$ м притягивает к себе второй заряд с силой $F = 2 \cdot 10^{-4}$ Н. Определить величину второго заряда q_2 . (Ответ: $0,83 \cdot 10^{-9}$ Кл).

10. Два одинаковых шарика имеют заряды $q_1 = -1,3 \cdot 10^{-10}$ Кл и $q_2 = 0,8 \cdot 10^{-10}$ Кл. Шары соединяют. Определить заряд каждого шарика после соединения. Чему равно число избыточных электронов на них? (Ответ: $1,2 \cdot 10^{-10}$ Кл; $0,15 \cdot 10^9$ электронов).

13. Сила взаимодействия двух зарядов в воздухе на расстоянии $r_1 = 5$ см равна $F_1 = 12 \cdot 10^{-5}$ Н. В керосине сила взаимодействия этих же зарядов на расстоянии $r_2 = 0,1$ м равна $F_2 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Н. Определить относительную диэлектрическую проницаемость керосина. (Ответ: 2).

14. Два маленьких шарика имеют заряды $q_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Кл и $q_2 = 4,5 \cdot 10^{-7}$ Кл и находятся в вакууме. Сила их электрического взаимодействия равна 0,1 Н. Определить расстояние между шариками. (Ответ: 0,009 м).

1.6. РАБОТА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ЗАРЯДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Электрическое поле действует на заряд с некоторой силой, поэтому заряд перемещается в электрическом поле. При этом поле совершает работу. Заряд может также перемещаться под действием неэлектрических сил против сил поля. Если угол между вектором силы и вектором перемещения заряда острый ($\alpha < 90^\circ$), то работу совершает поле. Работа в этом случае положительная ($\cos\alpha > 0$). Если этот угол тупой, то работа отрицательная ($\cos\alpha < 0$).

Рассмотрим, от чего зависит работа по перемещению заряда в электрическом поле. Из механики известно, что работа силы $A = (\vec{F} \cdot \vec{r})$. Пусть точечный заряд q_0 перемещается в однородном электрическом поле из точки A в точку B (рис. 1.12, а).

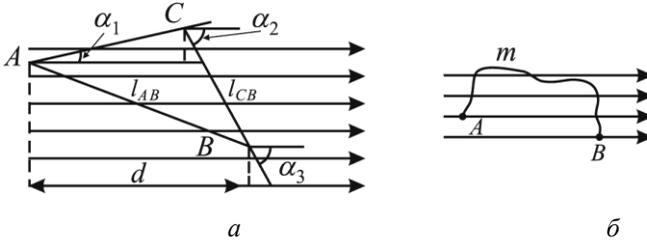


Рис. 1.12. Перемещение заряда в электрическом поле

Выясним, зависит ли работа электрических сил при перемещении заряда из одной точки поля в другую от формы пути. Из точки A в точку B заряд может попасть по пути AB или по пути ACB . Найдём A_{AB} и A_{ACB} :

$$\begin{aligned}
 A_{AB} &= (\vec{F} \cdot \vec{r}) = Fl_{AB} \cos \alpha_1 = Fd; \\
 A_{ACB} &= A_{AC} + A_{CB} = Fl_{AC} \cos \alpha_2 + Fl_{CB} \cos \alpha_3 = \\
 &= F(l_{AC} \cos \alpha_2 + l_{CB} \cos \alpha_3) = Fd,
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

где d — расстояние между начальным и конечным положениями заряда в электрическом поле (вдоль силовой линии); $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — углы между направлением перемещения заряда и силовой линией электрического поля.

В обоих случаях выражение работы одинаково. Работа по перемещению заряда в однородном электрическом поле

$$A = Fl \cos \alpha = Fd \quad \text{или} \quad A = Eq_0 l \cos \alpha.$$

В случае, когда заряд движется в электрическом поле по произвольному криволинейному пути (рис. 1.12, б), кривую линию можно разделить на множество малых прямолинейных отрезков. Работа на пути AmB равна сумме элементарных работ на малых отрезках, как и в уравнении (1.5).

Мы видим, что работа по перемещению заряда в однородном электрическом поле не зависит от формы пути, а зависит только от расстояния между начальным и конечным положениями заряда в однородном электрическом поле (вдоль силовой линии).

Если заряд перемещается в неоднородном электрическом поле, то напряжённость во всех точках поля различна. Следовательно, сила, действующая на точечный заряд q_0 в различных точках этого поля, тоже различна, так как $\vec{F} = \vec{E}q_0$.

В этом случае работа по перемещению заряда в электрическом поле равна сумме элементарных работ, найденных на элементарных участках пути, на которых напряжённость E постоянна и $|\Delta\vec{r}| = \Delta l$:

$$A = \sum q_0 E \Delta l \cos \alpha.$$

При перемещении заряда из одной точки электростатического поля в другую совершаемая работа является мерой изменения потенциальной энергии заряда в этом поле. Если обозначить потенциальную энергию заряда в начальном положении E_{n1} , а в конечном — E_{n2} , то работа перемещения заряда между этими точками поля определяется соотношением $A = -(E_{n2} - E_{n1})$, где изменение энергии $\Delta E_n = E_{n2} - E_{n1}$ берётся с противоположным знаком.

Если электростатическое поле совершает положительную работу, то потенциальная энергия заряженного тела в поле уменьшается: $(E_{n2} - E_{n1}) < 0$. Одновременно с этим, согласно закону сохранения энергии, увеличивается кинетическая энергия заряженного тела. Это используется для ускорения электронов электрическим полем в электронных приборах.

Если положительно заряженная частица движется в поле против направления силовых линий, то совершается отрицательная работа. Потенциальная энергия частицы в поле увеличивается ($\Delta E_n > 0$), а кинетическая энергия уменьшается (частица тормозится).

Обратите внимание!

1. Работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, а определяется только положением начальной и конечной точек и величиной заряда. Силовые поля, обладающие таким свойством, называются потенциальными (или консервативными) полями.

2. Работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории равна нулю.

3. Согласно закону сохранения энергии, при совершении положительной работы электрическим полем во время перемещения заряда происходит уменьшение его потенциальной энергии в поле и одновременно увеличение кинетической энергии. Вследствие этого происходит ускорение этой заряженной частицы электрическим полем.

4. Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении точечного заряда q из точки (1) в точку (2), равна разности значений потенциальной энергии в этих точках и не зависит от пути перемещения заряда и от выбора точки (0).

5. Вспомним, что работа над телом совершается в том случае, если к нему прилагается некоторая сила, и оно перемещается параллельно ей или её компоненту. Для совершения работы требуется, чтобы сила, приложенная к телу, была направлена против кулоновской силы. То же самое происходит при подъёме тела над земной поверхностью: вы должны приложить силу, направленную противоположно силе тяжести.

Слова и словосочетания

произвольный путь	элементарный участок
элементарная работа	форма пути
перемещение заряда	однородное поле

 *Это интересно!*

Электрический разряд можно наблюдать на примере электрофорной машины или лейденской банки. Разряд лейденской банки сопровождается электрической дугой, причина возникновения которой в том, что при ионизации газа в воздухе возникает канал, по которому электроны могут свободно перейти на положительно заряженную пластину. Такой же канал, только громадный, возникает при разряде молнии, и по нему в землю устремляется накопленный в грозовом облаке электрический заряд. Интересно узнать, что для возникновения электрической дуги в сухом воздухе, т.е. для его ионизации, необходимо создать разность потенциалов около 30 кВ/см. Канал молнии или разряда является проводником для электронов, по которому электроны могут свободно двигаться от одного его конца — облака — к другому, к земле, как будто по металлическому проводу. А вообще проводник разряда вовсе не обязательно должен быть металлическим, это может быть и ионизованный воздух.

Упражнение 1.6

1. Почему заряд перемещается в электрическом поле?
2. Почему работа, совершаемая внешними силами по перемещению заряда против сил электростатического поля всегда отрицательная? Рассмотреть два случая: перемещения положительного и отрицательного зарядов.
3. Два точечных заряда, находясь в воздухе ($\epsilon_v = 1$) на расстоянии $r = 20$ см друг от друга взаимодействуют с некоторой силой. Во сколько раз изменится расстояние между зарядами, если они будут находиться в спирте ($\epsilon_c = 25$)? (Ответ: уменьшится в 5 раз).
4. Чему равна работа сил электростатического поля при перемещении заряда по любой замкнутой траектории?
5. Как изменяется потенциальная энергия заряженного тела в поле, если электростатическое поле совершает положительную работу?
6. В каком случае совершается отрицательная работа?
7. От чего не зависит работа сил электростатического поля при перемещении заряда из одной точки поля в другую?

1.7. ПОТЕНЦИАЛ. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ

Силовой характеристикой точек электрического поля является напряжённость \vec{E} . Другой важной характеристикой является энергетическая характеристика.

Потенциал электрического поля φ — это энергетическая характеристика точек этого поля.

Потенциалом электростатического поля в данной точке называется скалярная физическая величина, численно равная отношению потенциальной энергии положительного заряда, помещённого в эту точку поля, к этому заряду:

$$\varphi = \frac{E_{\text{т}}}{q_0}$$

Потенциал представляет собой работу сил поля по перемещению точечного единичного заряда q_0 из некоторой точки электрического поля в бесконечность (подразумевается, что в «бесконечности» нет электрического поля).

$$\varphi = \frac{A_{1\infty}}{q_0}.$$

Потенциал — величина скалярная и может иметь положительные и отрицательные значения.

Если поле создано положительным зарядом, то на точечный заряд действует сила в сторону бесконечности. Силы поля выполняют положительную работу ($A > 0$) и точки поля имеют положительный потенциал ($\varphi > 0$).

Если поле создано отрицательным зарядом, то на точечный заряд будет действовать сила в сторону заряда, создающего поле. Силы поля выполняют отрицательную работу, и точки поля имеют отрицательный потенциал ($\varphi < 0$). Внешние силы, которые будут перемещать заряд из данной точки поля в бесконечность против сил поля, выполняют положительную работу. Получим единицу измерения потенциала в СИ: $1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}} = 1\frac{\text{Дж}}{\text{Кл}}$.

Потенциал в какой-нибудь точке электрического поля на расстоянии r от заряда q в СИ вычислим по формуле

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

На практике часто заряд перемещается из данной точки не в бесконечность, а в другую точку поля.

Разность потенциалов двух точек 1 и 2 электрического поля — это работа сил поля по перемещению единичного положительного заряда из одной точки в другую.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

Отсюда определим работу электрического поля по перемещению заряда между точками 1 и 2

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Некоторые точки пространства вокруг заряженного тела (или сама поверхность заряженного тела) имеют одинаковые потенциалы.

Единица разности потенциалов в СИ — вольт (В).

Один вольт — это разность потенциалов между двумя точками электрического поля, при которой работа перемещения заряда в 1 Кл из одной точки в другую равна 1 Дж:

Разность потенциалов между точками 1 и 2, которые находятся на расстоянии r_1 и r_2 от заряда q :

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Если предположить, что точка 2 находится в бесконечности, тогда $r_2 = \infty$ и потенциал точки 1 $\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1}$.

Разность потенциалов ($\varphi_1 - \varphi_2$) называется *напряжением* и обозначается буквой « u ».

Единица напряжения в СИ — вольт: $[u] = \text{В}$.

Получим формулу, связывающую разность потенциалов с напряжённостью электрического поля. Работа по перемещению заряда от точки 1 до точки 2

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ или } A = Fd.$$

Приравняем правые части этих равенств и подставим сюда значение силы $F = Eq$, получаем: $q(\varphi_1 - \varphi_2) = Edq$. Отсюда:

$$E = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{d} = \frac{u_{12}}{d}. \quad (1.6)$$

Величина напряжённости электрического поля равна напряжению на единицу длины силовой линии.

Единица напряжённости в СИ — вольт на метр: $[E] = \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Для наглядного представления электрического поля наряду с силовыми линиями используют эквипотенциальные поверхности.

Поверхность, во всех точках которой потенциал электрического поля имеет одинаковые значения, называется *эквипотенциальной поверхностью* или *поверхностью равного потенциала*.

Эквипотенциальные поверхности — это поверхности, на которых разность потенциалов любых двух точек равна нулю. При перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности не совершается работа ($\varphi_1 - \varphi_2 = 0$).

Силовые линии электрического поля всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

Эквипотенциальные поверхности кулоновского поля точечного заряда — концентрические сферы. На рис. 1.13 представлены картины силовых линий и эквипотенциальных поверхностей некоторых простых электростатических полей.

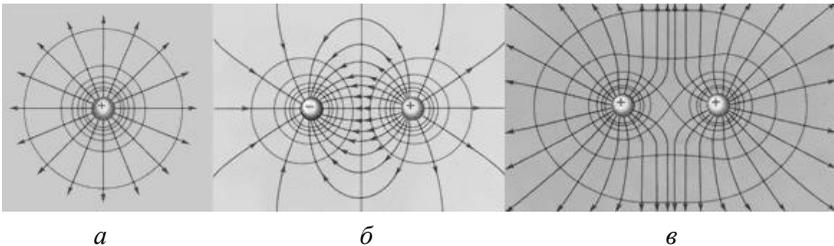


Рис. 1.13. Эквипотенциальные поверхности и силовые линии простых электрических полей: *a* — точечный заряд; *b* — электрический диполь; *c* — два равных положительных заряда.

Вокруг зарядов можно провести бесконечное множество эквипотенциальных поверхностей. Условились проводить их так, чтобы разность потенциалов между любыми двумя соседними эквипотенциальными поверхностями были одинаковы. Для однород-

ного поля эквипотенциальные поверхности представляют собой плоскости, для точечного заряда — концентрические сферы (рис. 1.13, а).

По известному расположению линий напряжённости поля можно построить эквипотенциальные поверхности и, наоборот, по известному расположению эквипотенциальных поверхностей можно в каждой точке поля определить модуль и направление вектора напряжённости поля.

Прибор для измерения разности потенциалов называется *электрометром*.

Если прикоснёмся заряженным телом к стержню электрометра, то его стрелка отклонится. Отклонение стрелки зависит от силы, действующей на стрелку, а, значит, от напряжённости электрического поля. Чем больше напряжённость поля внутри электрометра, тем больше разность потенциалов между стержнем и корпусом электрометра. При этом корпус соединяют с землёй, потенциал которой считают равным нулю. Можно стержень электрометра соединить проводником с каким-нибудь заряженным телом.

В этом случае электрометр показывает разность потенциалов между заряженным телом и землёй (рис. 1.14).

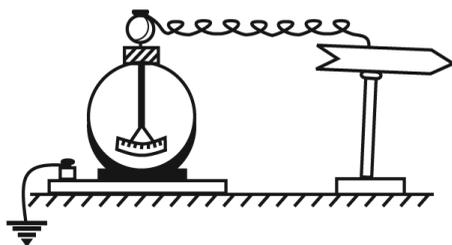


Рис. 1.14. Измерение потенциала заряженного тела

Примеры решения задач

Задача 1. Точечный заряд $q_0 = 7 \cdot 10^{-9}$ Кл находится в точке 1 на расстоянии $l_1 = 0,9$ м от поверхности шара радиусом 10 см, несущего заряд с поверхностной плотностью $\sigma = 3 \cdot 10^{-5}$ Кл/м². Определить работу по перемещению заряда q_0 в точку 2, расположенную на расстоянии $r_2 = 50$ см от центра шара. Окружающая среда — воздух.

<p>Дано:</p> $q_0 = 7 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ $l_1 = 0,9 \text{ м}$ $r_2 = 50 \text{ см} = 0,5 \text{ м}$ $R_{\text{ш}} = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$ $\sigma = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$ $r_1 = l_1 + R_{\text{ш}}$ $A = ?$	<p>Решение:</p> <p>Если поверхностная плотность шара σ, то его заряд равен $q = \sigma S$, где $S = 4\pi R_{\text{ш}}^2$ — площадь поверхности шара. Следовательно, $q = 4\pi\sigma R_{\text{ш}}^2$.</p> <p>Электрическое поле вокруг заряжен-</p>
---	---

ного шара имеет в точках 1 и 2 потенциалы

$$\varphi_1 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_1} = \frac{4\pi\sigma R_{\text{ш}}^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon(l_1 + R_{\text{ш}})} = \frac{\sigma R_{\text{ш}}^2}{\varepsilon_0\varepsilon(l_1 + R_{\text{ш}})},$$

$$\varphi_2 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_2} = \frac{4\pi\sigma R_{\text{ш}}^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_2} = \frac{\sigma R_{\text{ш}}^2}{\varepsilon_0\varepsilon r_2}.$$

При перемещении заряда q_0 из точки 1 в точку 2 совершается работа $A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2)$. После преобразований получим

$$A = q_0 \left[\frac{\sigma R_{\text{ш}}^2}{\varepsilon_0\varepsilon(l_1 + R_{\text{ш}})} - \frac{\sigma R_{\text{ш}}^2}{\varepsilon_0\varepsilon r_2} \right] = \frac{q_0 \sigma R_{\text{ш}}^2}{\varepsilon_0\varepsilon} \left(\frac{1}{l_1 + R_{\text{ш}}} - \frac{1}{r_2} \right);$$

$$A = \frac{7 \cdot 10^{-9} \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot (0,1)^2}{8,85 \cdot 10^{-12}} \left(\frac{1}{0,9 + 0,1} - \frac{1}{0,5} \right) = -2,4 \cdot 10^{-4} \text{ (Дж)}.$$

Знак минус указывает на то, что внешние силы выполняли работу по перемещению заряда q_0 против сил электрического поля. Потенциальная энергия, наоборот, по мере перемещения заряда из начальной точки 1 в конечную точку 2 увеличилась.

Ответ: работа по перемещению заряда q_0 $A = -2,4 \cdot 10^{-4}$ Дж.

Задача 2. Медный шар диаметром 0,01 м помещён в масло. Напряжённость электрического поля в масле 3600 В/м, вектор напряжённости имеет направление вверх. Чему равен положительный заряд шара, если в однородном электрическом поле шар оказался взвешенным в масле? Плотность меди $\rho_1 = 8600 \text{ кг/м}^3$, плотность масла $\rho_2 = 800 \text{ кг/м}^3$.

Дано: $r = D/2 = 0,005 \text{ м}$ $E = 3600 \text{ В/м}$ $\rho_1 = 8600 \text{ кг/м}^3$ $\rho_2 = 800 \text{ кг/м}^3$ <hr/> $ q \text{ — ?}$	Решение: В масле между обкладками конденсатора на медный шар действуют: $m\vec{g}$ — сила тяжести; \vec{F}_1 — сила электростатического поля; \vec{F}_2 — выталкивающая сила Архимеда.
--	---

При равновесии шара уравнение результирующей силы в скалярной форме относительно оси OY принимает вид

$$F_1 + F_2 - mg = 0, \text{ где } m = \frac{4}{3}\rho_1\pi r^3 g, F_1 = qE \text{ и } F_2 = \frac{4}{3}\rho_2\pi r^3 g$$

(ρ_1 — плотность меди; ρ_2 — плотность масла). Следовательно,

$$qE + \frac{4}{3}\rho_2\pi r^3 g - \frac{4}{3}\rho_1\pi r^3 g = 0, \text{ откуда}$$

$$q = 4\pi r^3 g(\rho_1 - \rho_2)/(3E);$$

$$|q| = 4 \cdot 3,14 \cdot 5^3 \cdot 10^{-9} \cdot 9,8 \cdot (8600 - 800)/(3 \cdot 3600) = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ Кл.}$$

Ответ: положительный заряд шара $|q| = 1,1 \cdot 10^{-5}$ Кл.

Задача 3. Два шарика с зарядами $13,3 \cdot 10^{-7}$ и $6,7 \cdot 10^{-7}$ Кл находятся на расстоянии 40 см друг от друга. Какую работу необходимо выполнить, чтобы сблизить их до расстояния 25 см?

Дано: $q_1 = 13,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ $q_2 = 6,7 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ $r_1 = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}$ $r_2 = 25 \text{ см} = 0,25 \text{ м}$ <hr/> $A \text{ — ?}$	Решение: Для упрощения решения удобно считать, что шарик с зарядом q_1 неподвижен и образует электрическое поле. В этом поле шарик с зарядом q_2 движется из точки, находящейся на расстоянии
--	--

r_2 от центра шарика с зарядом q_1 , в точку, находящуюся на расстоянии r_2 от первого шарика. Тогда работа, которую при этом совершает внешняя сила, определяется по формуле $A = q_2(\varphi_1 - \varphi_2)$, где $\varphi_1 = q_1/(4\pi\epsilon_0\epsilon r_1)$ и $\varphi_2 = q_1/(4\pi\epsilon_0\epsilon r_2)$ — потенциалы начальной

и конечной точек перемещения заряда q_2 в электрическом поле заряда q_1 . После преобразования получаем

$$A = q_2 \left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_2} \right) = \frac{q_1 q_2 (r_2 - r_1)}{4\pi\epsilon_0\epsilon r_1 r_2};$$

$$A = \frac{13,3 \cdot 10^{-7} \cdot 6,7 \cdot 10^{-7} \cdot (0,25 - 0,4)}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,4 \cdot 0,25} \approx -1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Ответ: для сближения зарядов необходимо выполнить работу $A = -1,2 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Обратите внимание!

1. Потенциал поля в данной точке пространства равен работе, которую совершают электрические силы при удалении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

2. Разность потенциалов (напряжение) между двумя точками численно равна работе, которую совершают силы электростатического поля при перемещении положительного заряда 1 Кл между этими точками.

3. Напряжённость однородного электростатического поля равна отношению напряжения (разности потенциалов) к длине, взятой вдоль силовой линии поля.

4. Физический смысл имеет разность потенциалов между двумя точками поля, а не значения потенциалов в этих точках, так как точку с нулевым потенциалом выбирают условно с целью упростить решение теоретических и практических задач электростатики.

5. В случае однородного поля эквипотенциальные поверхности представляют собой систему параллельных плоскостей.

Слова и словосочетания

потенциал	электромметр
разность потенциалов	стержень
эквипотенциальная поверхность	корпус
напряжение	бесконечность

 *Это интересно!*

Электрическое напряжение в розетках, как правило, составляет 220 вольт. При этом они обеспечивают ток в 10 – 15 ампер и даже больше. Правда, речь идёт не о постоянном токе, а о переменном. Это означает, что электроны в проводнике движутся то в одну, то в другую сторону. В большинстве стран Европы и в России стандартная частота тока равна 50 Гц, а в США — 60 Гц. В цепях постоянного тока направление движения электронов не изменяется.

Даже малого заряда достаточно, чтобы причинить вред здоровью. Ток в 50 мА уже может вызвать ощутимые болевые ощущения. Ток в 100 мА способен нарушить работу сердца и даже вызвать его остановку у людей, страдающих сердечными болезнями.

Напряжение и разность потенциалов измеряют специальным прибором — вольтметром.

Одиночные элементы и аккумуляторы рассчитаны на напряжение порядка полутора вольт. Для разных целей используются разные электрические элементы.

В следующих подразделах мы научимся собирать из отдельных элементов батареи. Батареи обычно требуются, чтобы получить разность потенциалов в 3,0 В или 4,5 В. Также может понадобиться батарея, обеспечивающая вдвое большим током, чем дают одиночные элементы. Такой постоянный ток может понадобиться для длительного питания фонарика или транзисторного радиоприёмника. Батарея представляет собой комбинацию нескольких элементов тока. Её специально делают так, чтобы она по определённым характеристикам превзошла возможности одного элемента. Батарея может дать либо большой ток, либо более высокое напряжение, либо и то, и другое. У электрической цепи может быть ветвь, подсоединённая параллельно другим элементам.

Система двух равных по абсолютной величине точечных зарядов противоположного знака, находящихся на расстоянии l друг от друга, называется электрическим диполем. Небольшое проводящее тело или небольшое диэлектрическое тело в электрическом поле приближённо можно рассматривать как диполь. Молекулы, состоящие из положительных и отрицательных ионов, центры которых смещены, также являются диполями.

Упражнение 1.7

1. Что называется потенциалом электрического поля?
2. Какая единица потенциала в СИ?
3. Что называется напряжением?
4. Какие поверхности называются эквипотенциальными?
5. Как называется прибор для измерения разности потенциалов?

6. Что представляют собой эквипотенциальные поверхности точечного заряда?

7. Металлическому шару радиусом 10 см сообщён заряд 10^{-7} Кл. Определить электрический потенциал на поверхности шара. (Ответ: $\varphi = 9$ кВ).

8. Какие заряды перемещаются в электрическом поле от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим потенциалом, а какие — наоборот, от точек с меньшим потенциалом к точкам с большим потенциалом?

9. Ток силой 20 А, протекая по кольцу из медной проволоки сечением $1,0 \text{ мм}^2$, создаёт в центре кольца напряжённость магнитного поля 178 А/м. Какая разность потенциалов приложена к концам проволоки, образующей кольцо? (Ответ: 0,12 В).

10. Два одинаковых маленьких шарика имеют заряды $q_1 = 7 \cdot 10^{-9}$ Кл и $q_2 = -5 \cdot 10^{-9}$ Кл. Шары приводят в соприкосновение, а потом удаляют на расстояние $r = 0,02$ м. Определить силу их электрического взаимодействия на этом расстоянии. (Ответ: $2,25 \cdot 10^{-5}$ Н).

11. Два точечных заряда $q_1 = 0,66 \cdot 10^{-7}$ Кл и $q_2 = 1,1 \cdot 10^{-5}$ Кл находятся в воде на расстоянии $r_1 = 0,033$ м. Определить силу их электрического взаимодействия. На каком расстоянии r_2 нужно поместить эти заряды в вакууме, чтобы сила взаимодействия их не изменилась?

12. В однородном электростатическом поле разность потенциалов между точками, лежащими на одной силовой линии на расстоянии 9 см, равна 360 В. Найти модуль вектора напряжённости поля. (Ответ: 6000 В/м).

13. Какой скоростью обладает электрон, если его ускоряет поле с разностью потенциалов 100 В? (Ответ: $6 \cdot 10^6$ м/с).

1.8. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ ЗАРЯДА

Потенциальную энергию имеют тела, которые находятся на некотором расстоянии друг от друга и взаимодействуют между собой. Заряд в электрическом поле тоже имеет потенциальную энергию. Если в поле положительного заряда q поместить точечный положительный заряд q_0 , то он будет удаляться в бесконечность под действием сил поля. Силы поля совершают работу.

Мерой потенциальной энергии $E_{\text{п}}$ заряда является работа A , которую выполняет поле:

$E_{\text{п}} = A$, но $A = q_0\phi$, тогда $E_{\text{п}} = q_0\phi$, где ϕ — потенциал точки поля.

Итак, потенциальная энергия заряда в некоторой точке поля прямо пропорциональна произведению величины заряда на потенциал этой точки. Кинетическая энергия заряда не изменяется, если этот заряд движется в электрическом поле под действием сил поля.

Пусть заряд q_0 массой m движется в вакууме под действием сил электрического поля. По закону сохранения энергии сумма кинетической и потенциальной энергии этого заряда не изменяется

$$E_{\text{к}} + E_{\text{п}} = \text{const.}$$

В какой-то момент заряд q_0 проходит точку, потенциал которой ϕ_1 со скоростью v_1 .

Сумма кинетической и потенциальной энергии заряда в этой

точке поля
$$E_{\text{к}1} + E_{\text{п}1} = \frac{mv_1^2}{2} + q_0\phi_1.$$

Через некоторое время под действием поля заряд переместится в другую точку с потенциалом ϕ_2 , где его скорость будет v_2 .

В этой точке сумма кинетической и потенциальной энергии

$$E_{\text{к}2} + E_{\text{п}2} = \frac{mv_2^2}{2} + q_0\phi_2.$$

Но $E_{\text{к}1} + E_{\text{п}1} = E_{\text{к}2} + E_{\text{п}2} = \text{const}$, поэтому $\frac{mv_1^2}{2} + q_0\phi_1 = \frac{mv_2^2}{2} + q_0\phi_2$.

Если в точке с потенциалом ϕ_1 заряд не двигался, то в точке с потенциалом ϕ_2 заряд будет иметь кинетическую энергию $E_{\text{к}}$:

$$E_{\text{к}} = \frac{mv_2^2}{2} = q_0(\phi_1 - \phi_2) = q_0u_{12}, \quad \frac{mv_2^2}{2} = q_0u_{12}.$$

 *Это интересно!*

Энергия — это количество или мера изменения или возможного изменения материи, и является введенной человеком субъективной величиной, несуществующей в природе.

Материя имеет два основных и единственных показателя своего состояния: заряд и потенциал, которые являются объективными величинами, существующими в природе.

При всем многообразии законов и разделов физики существует небольшой набор общих законов, которые обобщают остальные законы и помогают легче понять саму физику. Каждый раздел физики изучает свой вид энергии, её поведение и взаимодействие с другими видами энергий. Поэтому, основа всего — это энергия. Энергия изменения проявляет себя каким-либо действием. При этом происходит изменение материи. Известно, что любое действие имеет результат. Поэтому, можно утверждать, что количество энергии E равно произведению количества действия на количество результата. Количеством действия можно назвать изменение Δ заряда Q энергии E (энергозаряд), а количеством результата действия можно назвать изменение Δ потенциала ϕ , что является напряжением U энергии E (энергонапряжение).

В каждом разделе физики энергозаряд и энергонапряжение имеют свои единицы измерения и обозначены своими величинами. Например, в разделе физики «Электричество» энергозарядом служит электрический заряд q (Кулон), энергонапряжением — электрическое напряжение U (Вольт), а энергопотенциалом — электрический потенциал ϕ (Вольт).

Упражнение 1.8

1. Какой энергией обладает заряд в электрическом поле?
2. Чему пропорциональна потенциальная энергия заряда в некоторой точке поля?
3. Записать формулу для определения кинетической энергии заряда.
4. Шарик массой $m = 1$ г перемещается из точки 1 с потенциалом $\phi_1 = 600$ В в точку 2 с потенциалом $\phi_2 = 0$. Определить скорость v_1 шарика в точке 1, если в точке 2 его скорость стала равной $v_2 = 20$ см/с. Заряд шарика $q = 10^{-8}$ Кл. (Ответ: 0,17 м/с).

1.9. ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬ ПРОВОДНИКА

Возьмём удалённый от других проводников заряженный проводник и будем сообщать ему различные заряды. Потенциал ϕ такого проводника прямо пропорционален заряду q на проводнике. Это означает, что для уединённого проводника отношение q/ϕ есть величина постоянная. Но если сообщать одинаковые заряды разным проводникам, потенциалы их будут разными и, следовательно, отношение q/ϕ для них будет разным. Потенциал наэлектризованного проводника зависит не только от заряда q , но и от геометрических размеров и формы проводника. Если зарядить два шара разных радиусов одинаковым зарядом q , то потенциал шара с меньшим радиусом будет большим.

Электроёмкость проводника — это величина, которая характеризует зависимость потенциала наэлектризованного проводника от его размеров, формы и окружающей среды.

Электроёмкость проводника обозначается буквой C и измеряется количеством электричества, которое необходимо для повышения потенциала этого проводника на единицу

$$C = \frac{q}{\phi}. \quad (1.7)$$

Подставим значение потенциала точечного заряда в формулу (1.7)

$$C = \frac{q4\pi\epsilon_0\epsilon r}{q} = 4\pi\epsilon_0\epsilon r. \quad (1.8)$$

Электроёмкость C для данного тела имеет неизменное значение.

Электроёмкость шара в СИ вычислим по формуле

$$C_{\text{ш}} = 4\pi\epsilon_0\epsilon r, \quad (1.9)$$

где r — радиус шара. Из формулы (1.9) видно, что электроёмкость шара не зависит ни от материала шара, ни от его массы (из середины шара можно удалить любую часть вещества), так как свободные заряды распределяются только на поверхности проводника.

Электроёмкость уединённого металлического шара зависит от окружающей среды, в которой находится шар и определяется размерами проводника. Если металлическому шару сообщить некоторый заряд q , то под действием электрического поля шара происходит поляризация окружающей его диэлектрической среды. На поверхности диэлектрика, соприкасающейся с поверхностью шара

или расположенной вблизи неё, возникает поляризационный заряд q' противоположного знака, по величине меньше заряда q . Поляризационный заряд, расположенный вблизи поверхности заряженного тела, связывает часть его зарядов, в результате чего потенциал поверхности шара уменьшается, что свидетельствует (при неизменном q) об увеличении ёмкости шара. Чем больше диэлектрическая проницаемость среды, тем больше ёмкость помещённого в неё проводника.

Если заряженный шар соединить с электрометром, а затем охватить его ладонями рук (не прикасаясь), то можно наблюдать увеличение потенциала шара. Выведем единицу ёмкости:

$$C = \frac{q}{\varphi}; C = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}} = 1\text{Ф}.$$

Фарадой (Ф) называется ёмкость проводника, которому для повышения его потенциала на 1 вольт нужно сообщить 1 кулон электричества.

Ёмкость в 1 фараду может иметь шар радиусом $9 \cdot 10^6$ км, т.е. ёмкость в одну фараду очень велика. Поэтому чаще ёмкость выражают в микрофарадах или пикофарадах: $1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф}$, $1\text{пФ} = 10^{-12}\text{Ф}$.

Обратите внимание!

1. Отношение модуля заряда на любом проводнике к его потенциалу есть величина постоянная для каждого из них.

2. Уединённый проводник — это проводник, находящийся далеко от других заряженных тел. Размеры такого проводника должны быть во много раз меньше расстояния до других проводников или заряженных тел.

3. Понятие ёмкости уединённого проводника определяется через отношение заряда q к потенциалу φ , но ёмкость C не зависит ни от того, ни от другого и для данного тела имеет неизменное значение. Аналогичный пример можно привести из механики: скорость равномерного прямолинейного движения определяется через отношение пройденного пути к времени, но скорость не зависит ни от пути, ни от времени, так как является постоянной величиной.

4. Все заряды, сообщённые проводнику, распределяются по поверхности наэлектризованного проводника, независимо от того, полый он или сплошной.

5. Электроёмкость сферы прямо пропорциональна её радиусу и зависит от среды, в которой она находится.

Слова и словосочетания

электроёмкость	фарада
уединённый проводник	микрофарада
наэлектризованный	пикофарада
полый	сплошной

Упражнение 1.7

1. Какие тела имеют потенциальную энергию?
2. Что называется электроёмкостью проводника?
3. От чего зависит электроёмкость металлического шара?
3. Какая единица электроёмкости?
4. Какую скорость имеет электрон, который пролетел между точками с разностью потенциалов в 18 В, 100 В? Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г. (Ответ: $1,9 \cdot 10^4$ м/с).

5. Под действием электрического поля с напряжением U скорость электрона увеличилась от 0 до $6 \cdot 10^5$ м/с. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г, заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Найти напряжение U . (Ответ: 1023 В).

6. Пылинка массой 10^{-8} г находится в однородном электрическом поле между пластинками с разностью потенциалов 6000 В. Расстояние между пластинками 5 см. Пылинка находится в равновесии. Чему равен заряд пылинки? (Ответ: $0,83 \cdot 10^{-15}$ Кл).

7. Пылинка (о которой шла речь в предыдущей задаче) потеряла заряд, равный заряду 1000 электронов. Как надо изменить разность потенциалов между пластинками, чтобы она осталась в равновесии? (Ответ: 7500 В).

8. Какие заряды перемещаются в электрическом поле от точек с большим потенциалом к точкам с меньшим, а какие — наоборот: от точек с меньшим потенциалом к точкам с большим потенциалом?

1.10. КОНДЕНСАТОРЫ

В электро- и радиотехнике нужны приборы, которые могут обладать определённой электроёмкостью и накапливать большие заряды. Выясним, каким образом можно увеличить электроёмкость проводника.

Когда проводник электризуется, ему сообщают заряды одного знака, которые отталкиваются друг от друга. При этом потенциал проводника возрастает. Это затрудняет накопление на нём зарядов. Если близко к заряженному проводнику поместить другой проводник, заряженный противоположным зарядом, то на первом проводнике можно удержать больший заряд. Диэлектрик, помещенный между проводниками, способствует ещё большему накоплению зарядов. Он увеличивает электроёмкость и даёт возможность зарядам нейтрализоваться. Диэлектрическая проницаемость его должна быть как можно больше и изоляционные свойства по возможности лучше. В технике для накопления больших электрических зарядов применяют *конденсаторы*. Конденсаторы состоят из двух проводников, разделённых диэлектриком. Проводники конденсатора называются обкладками. Поскольку расстояние между обкладками конденсатора мало, то всё электрическое поле его зарядов сосредоточено между обкладками и окружающие тела не влияют на его электроёмкость.

Процесс накопления зарядов на обкладках конденсатора называется его зарядкой. Чтобы зарядить конденсатор, его подключают к полюсам источника тока. При этом необходимо учитывать, на какое рабочее напряжение рассчитан конденсатор. При превышении этого напряжения может произойти пробой конденсатора. При зарядке на обкладках конденсатора накапливаются равные по величине и противоположные по знаку заряды. Электрическое поле заряженного конденсатора сосредоточено в пространстве между обкладками, поэтому электроёмкость не зависит от окружающих тел.

Если обкладки конденсатора соединить проводником, то заряды, находящиеся на обкладках, будут нейтрализовать друг друга и произойдёт разрядка конденсатора. Конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных металлических обкладок, изолированных друг от друга, называется плоским конденсатором.

Ёлектроёмкость конденсатора

Ёлектроёмкостью конденсатора называют величину, численно равную отношению заряда конденсатора q к разности потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между пластинами конденсатора.

Для конденсатора формулу (1.7) можно записать:

$$C = \frac{q}{u}, \quad (1.10)$$

где u — разность потенциалов между обкладками конденсатора.

Поле внутри конденсатора складывается из полей положительно и отрицательно заряженных пластин. Напряжённость его

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

Поверхностная плотность заряда $\sigma = \frac{q}{S}$, где S — площадь одной обкладки конденсатора. С учётом поверхностной плотности σ напряжённость поля внутри конденсатора

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon S}. \quad (1.11)$$

Из формулы (1.6) найдём разность потенциалов и подставим в формулу (1.10)

$$C = \frac{q}{u} = \frac{q}{Ed}.$$

Подставив сюда значение напряжённости поля внутри конденсатора из формулы (1.11), получим формулу ёлектроёмкости плоского конденсатора

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

где d — расстояние между пластинами конденсатора.

Ёлектроёмкость плоского конденсатора прямо пропорциональна площади пластины, диэлектрической проницаемости среды и обратно пропорциональна расстоянию между ними.

Поскольку расстояние между обкладками и площадь пластин можно сделать небольшими, относительная диэлектрическая проницаемость может быть достаточно большой, то ёлектроём-

кость плоского конденсатора может быть велика при небольших его геометрических размерах.

Практическая польза понятия электроёмкости в том, что после теоретического вычисления или экспериментального измерения значения электроёмкости можно найти заряд конденсатора по известной разности потенциалов между обкладками.

Конденсатор, форма обкладок которого сферическая, называется сферическим, или шаровым. Если на обкладках сферического конденсатора имеется заряд q , то разность потенциалов между ними можно определить по формуле:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

где r_1 и r_2 — радиусы внутренней и внешней обкладок.

Учитывая, что

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

получим:

$$C = \frac{q \cdot 4\pi\epsilon\epsilon_0}{q \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)} = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1}.$$

Если внешний радиус r_2 намного больше внутреннего r_1 , то формула принимает простой вид:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r_2.$$

Если расстояние между сферическими обкладками r_1 и r_2 очень мало по сравнению со средним радиусом сферы r и $r_2 - r_1 = d$, то электроёмкости сферического конденсатора и плоского приблизительно равны

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{r_1 r_2}{r_2 - r_1} \approx 4\pi\epsilon_0\epsilon \frac{r^2}{d}.$$

Учитывая, что площадь поверхности обкладок $S = 4\pi r^2$, получим

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}.$$

Слова и словосочетания

потенциал возрастает	зарядка конденсатора
накопление зарядов	поверхностная плотность
конденсатор	плоский конденсатор
обкладки конденсатора	пластина

Упражнение 1.8

1. Обладает ли электроёмкостью незаряженный проводник?
(Ответ: да).

2. В паспорте конденсатора указано: 150 мкФ; 200 В. Какой наибольший допустимый электрический заряд можно сообщить данному конденсатору? (Ответ: $q = 3 \cdot 10^{-2}$ Кл).

3. Обкладки изолированного плоского конденсатора раздвигают так, что его электроёмкость изменяется от $C_1 = 100$ пФ до $C_2 = 80$ пФ. Какую работу выполняют при этом внешние силы, если заряд конденсатора $q = 1,6 \cdot 10^{-7}$ Кл? Поле между обкладками конденсатора остаётся однородным, а его напряжённость не изменяется. (Ответ: 0,003 Дж)

4. Из чего состоят конденсаторы?

1.11. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Параллельным называется такое соединение конденсаторов, при котором все положительно заряженные обкладки присоединяются к одному проводу, а отрицательно заряженные — к другому (рис. 1.15).

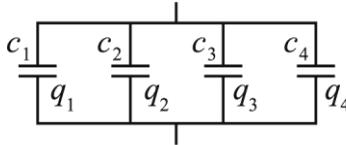


Рис. 1.15. Параллельное соединение конденсаторов

Электроёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов $C_{\text{бат}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n$.

Если к батарее подключено напряжение u , то заряды на конденсаторах будут соответственно $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$. Общий заряд

батареи равен сумме зарядов на отдельных конденсаторах $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$.

Электроёмкость батареи определим по формуле

$$C_{\text{бат}} = \frac{q}{u} = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_n}{u}, \text{ или}$$

$$C_{\text{бат}} = \frac{q_1}{u} + \frac{q_2}{u} + \dots + \frac{q_n}{u}; \quad C_{\text{бат}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

Если $C_1 = C_2 = \dots = C_n$, то $C_{\text{бат}} = C_n$.

При параллельном соединении общая электроёмкость возрастает.

Последовательным называется такое соединение, при котором отрицательно заряженная обкладка предыдущего конденсатора соединяется с положительно заряженной обкладкой последующего.

Электроёмкость батареи последовательно соединенных конденсаторов (рис. 1.16) вычислим по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{бат}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

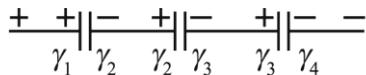


Рис. 1.16. Последовательное соединение конденсаторов

Выведем эту формулу. Отрицательно и положительно заряженные обкладки двух соседних конденсаторов составляют один проводник, заряженный под влиянием.

Эти обкладки имеют одинаковый потенциал φ . Отрицательный заряд на одной из обкладок равен положительному заряду на другой, т.е. при последовательном соединении на всех конденсаторах имеется одинаковый заряд q . Напряжение на батарее равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах. Действительно, если $u_1 = \varphi_1 - \varphi_2$, $u_2 = \varphi_2 - \varphi_3$, ..., то

$$u_1 + u_2 + \dots + u_n = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n) = (\varphi_1 - \varphi_n).$$

Но $\varphi_1 - \varphi_n = u_{\text{бат}}$. Таким образом, $u_{\text{бат}} = u_1 + u_2 + \dots = u_n$ или

$$\frac{q}{C_{\text{бат}}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \dots + \frac{q}{C_n}.$$

Сократим на q и получим $\frac{1}{C_{\text{бат}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$.

Если $C_1 = C_2 = \dots = C_n$, то $\frac{1}{C_{\text{бат}}} = \frac{n}{C}$ или $C_{\text{бат}} = \frac{C}{n}$.

При последовательном соединении напряжение на обкладках батареи возрастает, а ёмкость уменьшается.

Слова и словосочетания

соединение	провод
параллельное	последовательное

Упражнение 1.9

1. Что называется параллельным соединением конденсаторов?
2. Какое соединение конденсаторов называется последовательным?
3. К параллельно соединённым конденсаторам с электроёмкостью $C_2 = 2$ мкФ и $C_3 = 3$ мкФ последовательно подключён конденсатор $C_1 = 1$ мкФ. Определить электроёмкость батареи конденсаторов. (Ответ: 0,86 мкФ).

1.12. ЭНЕРГИЯ ЗАРЯЖЕННОГО КОНДЕНСАТОРА

Заряженный конденсатор имеет запас энергии. Это можно проверить на опыте. Соберём электрическую цепь (рис. 1.17). Если ключ находится в положении 1, то конденсатор заряжается от батареи. перебросим ключ в положение 2. Лампочка вспыхивает, значит, конденсатор разряжается, т.е. отдаёт накопленную энергию. От чего зависит энергия конденсатора?

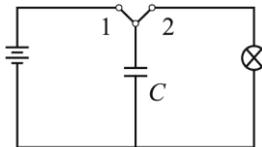


Рис. 1.17. Загорание лампы при разрядке конденсатора

Известно, что мерой изменения энергии является работа. Подсчитаем работу, которая совершается при зарядке конденсатора. Напряжение между пластинами при зарядке увеличивается от нуля до какого-то значения u . При этом заряд конденсатора тоже увеличивается. Работа по зарядке конденсатора (рис. 1.18) равна площади ΔAOB , т.е. $A = \frac{qu}{2}$. Энергия заряженного конденсатора

$$W = A = \frac{qu}{2} \quad \text{или} \quad W = \frac{Cu^2}{2}, \quad \text{так как} \quad q = Cu.$$

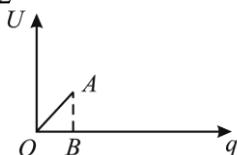


Рис. 1.18. Зависимость напряжения на конденсаторе от заряда

Энергию конденсатора можно выразить и через напряжённость электростатического поля:

$$W = \frac{1}{2} E^2 \varepsilon \varepsilon_0 S d,$$

где S — площадь пластины плоского конденсатора, d — расстояние между пластинами конденсатора.

1.13. ОПЫТ МИЛЛИКЕНА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЭЛЕМЕНТАРНОГО ЗАРЯДА

Американский учёный Р. Милликен в 1910 г. провёл опыт по определению величины элементарного заряда. Он помещал капельку масла массой m , заряженную методом ионизации, в однородное поле плоского горизонтального конденсатора (рис. 1.19).

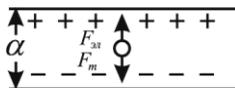


Рис. 1.19. Капелька масла в поле плоского конденсатора

Сила тяжести капельки масла и электрическая сила направлены противоположно. Капелька будет двигаться под действием разности этих сил.

Можно подобрать некоторую разность потенциалов, при которой капля будет висеть неподвижно. В этом случае $F_{эл}$ равна силе тяжести F_T : $F_{эл} = F_T$. Учитывая, что $F_T = mg$, $F_{эл} = Eq$, получим $Eq = mg$. Но $E = \frac{u}{d}$, поэтому $\frac{uq}{d} = mg$ или $q = \frac{mgd}{u}$, где q — заряд капельки масла; m — её масса; g — ускорение свободного падения; d — расстояние между обкладками конденсатора; u — разность потенциалов между ними.

Многочисленные опыты показали, что заряд капель является целым кратным от $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряд $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл является элементарным, т.е. он не делится на более мелкие части. Известно, что наименьшим отрицательным зарядом является заряд электрона. Следовательно, заряд электрона равен $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Р. Милликену удалось определить и величину наименьшего положительного заряда: $p = +1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Слова и словосочетания

мера изменения	электрическая цепь
капелька масла	элементарный
висеть неподвижно	кратный
метод ионизации	элементарный

Упражнение 1.10

1. Для чего в технике применяют конденсаторы?
2. Объяснить принцип действия конденсатора.
3. Что называется обкладками конденсатора?
4. Где сосредоточено электрическое поле заряженного конденсатора?
5. Написать формулу для определения электроёмкости плоского конденсатора.
6. По какой формуле можно определить энергию заряженного конденсатора?
7. Что экспериментально определил Р. Милликен?
8. Чему равен элементарный электрический заряд?
9. Два одинаково заряженных шарика диаметром 8 мм на

расстоянии 5 см между центрами взаимодействуют с силой $0,16 \cdot 10^{-3}$ Н. Найти потенциалы этих шариков. (Ответ: 15 000 В).

10. Заряд $q = 5 \cdot 10^{-8}$ Кл находится на расстоянии 0,45 м от поверхности заряженного шара диаметром 10 см. Потенциал шара φ равен 2400 В. Какую работу надо совершить, чтобы уменьшить расстояние между ними до 40 см? (Ответ: $48 \cdot 10^{-7}$ Дж).

11. Лейденская банка имеет размеры: диаметр дна 8 см, высота обкладок 17 см, толщина стекла 2 мм. Определить её ёмкость пользуясь формулой плоского конденсатора. (Ответ: 1477 пФ).

12. Какие ёмкости можно получить, если есть два конденсатора ёмкостью 200 пФ каждый? (Ответ: 100 пФ, 400 пФ).

13. Конденсаторы ёмкостью 2 мкФ и 5 мкФ соединены последовательно. Найти заряд и разность потенциалов на каждом конденсаторе, если конденсаторы подключены к источнику тока с напряжением 140 В. (Ответ: $q = 2 \cdot 10^{-4}$ Кл; $U_1 = 100$ В; $U_2 = 40$ В).

14. Плоский воздушный конденсатор состоит из двух пластин площадью по 100 мм^2 каждая, расстояние между пластинами 6 мм. На сколько нужно раздвинуть пластины конденсатора, чтобы его ёмкость не изменилась при погружении наполовину в керосин? Какой заряд находится на пластине, если конденсатор был заряжен до разности потенциалов 600 В до погружения в керосин? $\epsilon_{\text{керосин}} = 2,1$. (Ответ: $\Delta d = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $q \approx 9 \cdot 10^{-9}$ Кл).

2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК

2.1. УСЛОВИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И СУЩЕСТВОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Электрический ток — это любое упорядоченное движение электрических зарядов внутри вещества или в вакууме.

Для возникновения и существования электрического тока необходимы два условия: наличие свободных зарядов в данном проводнике и наличие сил (электрических полей), действующих на эти заряды.

Свободными зарядами в металлах являются электроны, в электролитах — положительные и отрицательные ионы, в газах — электроны и ионы.

Причиной возникновения длительного электрического тока не могут быть кулоновские силы. Эти силы быстро приводят к равновесию зарядов на проводниках, в результате чего электрическое поле в проводнике исчезает. Поэтому для существования тока в проводнике нужно, чтобы на свободные заряды действовали другие, неэлектростатические силы. Они ещё называются сторонними силами. Устройства, в которых возникают сторонние силы, называются источниками электродвижущей силы или источниками тока. В таких источниках происходит разделение разноименных зарядов за счёт процессов, например, химических (гальванические элементы), механических (электрические генераторы) и других.

Итак, необходимым условием возникновения и существования электрического тока, является наличие источника тока в электрической цепи, состоящей из проводников. Причем электрическая цепь должна быть замкнутой, тогда электрические заряды будут длительное время перемещаться внутри проводников.

Положительным направлением электрического тока является направление от положительно заряженного полюса источника тока к отрицательному.

Слова и словосочетания

электрический ток	необходимое условие
длительный	электрическая цепь
сторонние силы	замкнутая цепь
источник	полюс

2.2. ПОСТОЯННЫЙ ТОК. СИЛА ТОКА. ПЛОТНОСТЬ ТОКА

Если за любые равные промежутки времени через поперечное сечение проводника проходят одинаковые заряды, то электрический ток называется *постоянным током*.

Сила электрического тока — это заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Единица силы тока в СИ — ампер: $[I] = \text{А}$. Единица заряда — кулон: $[q] = \text{Кл}$. Кулон является производной единицей: $\text{Кл} = \text{А} \cdot \text{с}$.

Другие единицы измерения силы тока — миллиампер и микроампер: $1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А}$, $1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$.

Плотность тока — это величина, равная отношению силы тока в проводнике к площади поперечного сечения проводника

$$i = \frac{I}{S}.$$

Единица плотности тока в СИ — ампер на метр в квадрате:

$$[i] = \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

Плотность электрического тока — векторная физическая величина, направление которой совпадает с направлением упорядоченного движения положительных носителей тока.

Прибор для измерения силы тока — амперметр. Его включают в цепь последовательно тому участку, на котором измеряют силу тока.

Слова и словосочетания

постоянный ток

амперметр



Это интересно!

Андре Мари Ампер (1775 – 1836) — французский физик, математик и химик. Открыл закон взаимодействия электрических токов, сформулировал правило для определения действия тока на магнитную стрелку. Тесно связывал электрические и магнитные явления, предположив, что магнетизм объясняется микроскопическими токами внутри вещества. Изобрёл множество приборов, в том числе электромагнитных телеграф.

Упражнение 2.1

1. Что называется электрическим током?
2. Какие условия возникновения и существования электрического тока?
3. В каком случае электрический ток называется постоянным?
4. Что называется силой электрического тока?
5. Какая единица силы тока в СИ?
6. Что называется плотностью тока?
7. Как называется прибор для измерения силы тока?

2.3. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

Если между концами проводника есть разность потенциалов, то по проводнику идёт ток. Опыт показывает, что сила тока в этом проводнике (на участке цепи) прямо пропорциональна разности потенциалов на концах проводника:

$$I = k(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Коэффициент пропорциональности k зависит от рода проводника, его размеров и называется *проводимостью проводника*. Обратная величина $R = \frac{1}{k}$ называется *сопротивлением проводника*.

Разность потенциалов называется *напряжением*: $\varphi_1 - \varphi_2 = u$. Поэтому сила тока

$$I = ku; I = \frac{u}{R}.$$

В 1826 г. был открыт закон Ома: *сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке и обратно пропорциональна сопротивлению проводника на этом участке цепи*.

Что такое сопротивление проводника? При наличии тока в проводнике свободные электрические заряды одновременно с направленным движением принимают участие в хаотическом тепловом движении совместно с молекулами (атомами) проводника. При взаимодействии с молекулами проводника заряды отдают им часть кинетической энергии, приобретённой за счет энергии электрического поля, которое создаётся источником электрической энергии. Хаотическое движение молекул и других частиц проводника становится при этом интенсивнее, т.е. повышается температура проводника. В проводнике создаётся сопротивление электрическому току.

Таким образом, электрический ток выполняет работу по преодолению сопротивления проводника. В простейшей электрической цепи вся электрическая энергия расходуется на нагревание проводников.

Сопротивление проводника — это величина, которая характеризует противодействие электрическому току в проводнике.

Единица сопротивления в СИ — ом: $[R] = \frac{1\text{В}}{1\text{А}} = 1\text{Ом}$.

Единица проводимости в СИ — сименс:

$$[k] = \frac{1}{1\text{Ом}} = 1\text{Ом}^{-1} = 1\text{См}.$$

Соберём электрическую цепь и исследуем, от чего зависит сопротивление проводника.

Опыт показывает, что сопротивление проводника зависит от длины проводника (рис. 2.1). Чем длиннее проводник, тем больше напряжение на его концах при одинаковой силе тока во всей цепи. Следовательно, $R \sim l$.

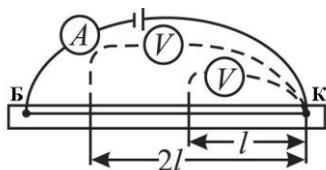


Рис. 2.1. Определение сопротивления проводника

Между точками Б и К будем включать проводники с разной площадью поперечного сечения S . Оказывается, что $R \sim \frac{1}{S}$. Сопротивление R проводников с одинаковыми l и S тоже разное, оно зависит от рода вещества

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.1)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника.

Удельное сопротивление проводника — это величина, равная сопротивлению проводника в единицу длины с поперечным сечением в единицу площади.

Из формулы (2.1) найдём удельное сопротивление проводника:

$$\rho = \frac{RS}{l}$$

В системе СИ единица удельного сопротивления — ом на метр: $[\rho] = (\text{Ом} \cdot \text{м})$, причём $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Удельные сопротивления проводников из разных веществ, найденные экспериментально, приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Вещество	ρ , Ом · м	$\alpha_{\text{град}}^{-1}$	Вещество	ρ , Ом · м	$\alpha_{\text{град}}^{-1}$
Алюминий	$0,27 \cdot 10^{-6}$	0,004	Свинец	$0,219 \cdot 10^{-6}$	0,004
Вольфрам	$0,055 \cdot 10^{-6}$	0,005	Серебро	$0,016 \cdot 10^{-6}$	0,004
Медь	$0,017 \cdot 10^{-6}$	0,004	Сталь	$0,1 \cdot 10^{-6}$	0,006
Железо	$0,1 \cdot 10^{-6}$	0,006	Цинк	$0,059 \cdot 10^{-6}$	0,004
Латунь	$0,08 \cdot 10^{-6}$	0,001	Никелин	$0,4 \cdot 10^{-6}$	—
Олово	$0,115 \cdot 10^{-6}$	0,004	Ртуть	$0,958 \cdot 10^{-6}$	0,009

Сопротивление проводника зависит от температуры. При увеличении температуры сопротивление многих металлов увеличивается. Эта зависимость для разных материалов различна. Она характеризуется температурным коэффициентом сопротивления α .

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t^\circ} \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{\Delta R}{R_0 t^\circ},$$

где R_t — сопротивление проводника при температуре t° ; R_0 — при 0°C . Для многих чистых металлов этот коэффициент почти одинаков и составляет примерно $0,004 \text{ град}^{-1}$ (около $1/273$). Для большинства сплавов этот коэффициент много больше. Для таких сплавов, как манганин и константан, сопротивление практически не зависит от температуры. Из этих сплавов изготавливают эталоны сопротивлений. Температурные коэффициенты сопротивлений приведены в

табл. 2.1. При использовании электрической энергии часто приходится изменять силу тока в цепи. Для этого обычно изменяют сопротивление цепи. Прибором для изменения сопротивления является *реостат*. Реостат включают в цепь последовательно с тем участком, в котором необходимо регулировать ток. Условные обозначения различных сопротивлений изображены на рис. 2.2.

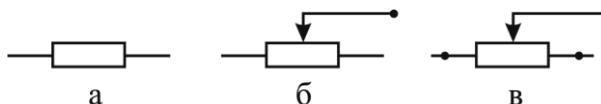


Рис. 2.2. Виды сопротивления:

а — сопротивление; *б* — реостат; *в* — потенциометр

Используются ползунковые, рычажные реостаты, магазины сопротивлений (штепсельные реостаты).

При прохождении тока провода реостата нагреваются. Для изготовления реостатов применяют специальные сплавы, сопротивление которых мало зависит от температуры (константан, манганин, никель, нихром). На каждом реостате написано его сопротивление и максимальная сила тока, на которую он рассчитан. Через реостат нельзя пропускать ток, больший максимально допустимого, потому что он перегорит.

Обратите внимание!

1. Единица измерения сопротивления Ом названа в честь немецкого физика Г. Ома. При заданной разности потенциалов ток в амперах обратно пропорционален сопротивлению в омах.

2. 1 Ом — это сопротивление проводника, в котором идёт ток силой 1 А при напряжении на его концах 1 В.

3. В электротехнике используют и другие единицы сопротивления: килом (кОм) и мегом (МОм). $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$; $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$.

4. Сопротивление проводника можно определить при помощи прибора омметра. Сопротивление обычно указывается на корпусе элемента или обозначается цветовым кодом. Его расшифровывают на упаковке сопротивлений.

5. Удельное сопротивление проводника характеризует зависимость сопротивления проводника от вида вещества.

6. В технике часто используют техническое удельное сопротивление. Сопротивление проводника длиной 1 м и площадью сечения 1 мм² называют техническим удельным сопротивлением.

7. Сопротивление проводника зависит от его длины, площади сечения и вида вещества. Сопротивление проводника зависит также от его температуры.

Примеры расчёта сопротивления проводника, силы тока и напряжения

Задача 1. Определить величину тока, который проходит через реостат, если напряжение на его клеммах 45 В. Реостат, изготовленный из никелиновой проволоки длиной 50 м и площадью сечения 2 мм².

<p>Дано: $u = 45 \text{ В}$ $l = 50 \text{ м}$ $S = 2 \text{ мм}^2$ $\rho = 0,42 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$</p> <hr/> <p>$I = ?$</p>	<p>Решение:</p> <p>В формулу закона Ома $I = \frac{u}{R}$ подставим значение сопротивления $R = \rho \frac{l}{S}$ и получим $I = \frac{uS}{\rho l}$.</p> <p>Подставляем числовые значения</p> $I = \frac{45 \cdot 2}{0,42 \cdot 50} = 0,9 \text{ (А)}.$
--	--

Ответ: сила тока в реостате 0,9 А.

Задача 2. Определить длину медного проводника площадью сечения 0,5 мм². Напряжение на концах проводника 127 В, а сила тока в нём 1,5 А.

<p>Дано: $u = 127 \text{ В}$ $S = 0,5 \text{ мм}^2$ $I = 1,5 \text{ А}$ $\rho = 0,017 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$</p> <hr/> <p>$l = ?$</p>	<p>Решение:</p> <p>Из формулы закона Ома $I = \frac{u}{R}$ определяем сопротивление $R = \frac{u}{I}$ и подставляем это значение в формулу расчёта сопротивления $R = \rho \frac{l}{S}$.</p>
---	---

Получим $\frac{u}{I} = \rho \frac{l}{S}$, отсюда определяем длину $l = \frac{uS}{I\rho}$.

Вычисляем длину $l = \frac{127 \cdot 0,5}{1,5 \cdot 0,017} = 2565$ (м).

Ответ: длина проводника 250 м.

Задача 3. Определить напряжение на концах алюминиевого проводника длиной 25 м и площадью сечения 5 см² при силе тока в нём 200 А.

Дано:

$$l = 25 \text{ м}$$

$$S = 5 \text{ см}^2 = 500 \text{ мм}^2$$

$$I = 200 \text{ А}$$

$$\rho = 0,028 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

$$u = ?$$

Решение:

Из формулы закона Ома $I = \frac{u}{R}$ и фор-

мулы расчёта сопротивления $R = \rho \frac{l}{S}$

получим $I = \frac{uS}{\rho l}$ или $u = \frac{I\rho l}{S}$.

Вычисляем напряжение:

$$u = \frac{200 \cdot 0,028 \cdot 25}{500} = 0,28 \text{ (В)}.$$

Ответ: напряжение на концах проводника 0,28 В.

Слова и словосочетания

проводимость

сопротивление

противодействие

рычажный реостат

виток провода

удельное сопротивление

реостат

потенциометр

ползунковый реостат

допустимый ток



Это интересно!

Георг Ом (1787 – 1854) — немецкий физик. Экспериментально открыл основной закон электрической цепи, вывел его теоретически. Глубоко изучил явление электрического сопротивления, ввёл важные для электротехники понятия. Установил различие между основным тоном звука и добавочными — обертонами. Также проводил исследования в области оптики.

Электрический ток в проводниках всегда встречает сопротивление. Его можно воспринимать подобно трению, мешающему движению автомобиля. Там, где есть сопротивление, там всегда выделяется тепло. Значит, часть электрической энергии переходит в тепловую.

Ползунковый реостат состоит из изолирующего цилиндра, на который намотан провод. Концы провода присоединены к клеммам. Над цилиндром есть металлический стержень, изолированный от провода. По стержню передвигается скользящий контакт. Один из проводников цепи, в которую включают реостат, соединяют с клеммой стержня, а второй — с клеммой цилиндра. Ток проходит только по части витков провода. Если изменять положение скользящего контакта, можно увеличивать или уменьшать длину провода, по которому идёт ток, а значит изменять сопротивление.

Аналогичное устройство имеет рычажный реостат. Он имеет несколько положений, при перемещении в которые ручки реостата изменяют его сопротивление. В случае, когда в цепь нужно включить известное сопротивление, применяют магазин сопротивления. Он состоит из проволочных катушек разного сопротивления. Концы проводов катушек присоединяют к медным пластинам, между которыми есть промежутки. Все катушки соединены последовательно. На крайних пластинках есть клеммы, при помощи которых прибор включают в цепь. В промежутках между пластинками можно вставить металлические штепсели. Если штепсель вставить между пластинками, тогда ток цепи не идёт через катушку (её сопротивление выключено), а идёт через штепсель. Против каждого промежутка написано сопротивление катушки. Если между пластинами поставить все штепсели, ток пойдёт по пластинам, реостат будет выключен. Чтобы создать в цепи определённое сопротивление, вынимают штепсель против катушек с необходимым сопротивлением.

Упражнение 2.2

1. Сформулировать закон Ома.
2. Что называется сопротивлением проводника?
3. Какая единица сопротивления в СИ?
4. Что называется удельным сопротивлением проводника?
5. Какая единица проводимости в СИ?

6. По проводнику сопротивлением 5 Ом за 1,5 мин прошло 45 Кл. Найти напряжение на концах проводника. (Ответ: 2,5 В).

7. Определить сопротивление реостата, если его обмотка состоит из 150 витков никелинового провода, диаметр витка 4 см и длина цилиндра с проводником 15 см. (Ответ: 9,6 Ом).

8. Медный провод длиной 1,0 км имеет сопротивление 2,90 Ом. Найти массу провода. (Ответ: 52 кг).

9. Сопротивление телеграфной линии при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ равно 88 Ом. Каково её сопротивление при температуре 0 и $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, если провод линии стальной? (Ответ: 100 Ом, 112 Ом).

10. Есть два проволочных проводника из одного металла. Длина второго проводника в 8 раз больше, чем первого, а площадь сечения первого проводника в 2 раза меньше, чем второго. Какой проводник имеет большее сопротивление и во сколько раз? (Ответ: $R_2 = 4 R_1$).

11. Рассчитать сопротивление медного проводника длиной 9 км и площадью поперечного сечения 60 мм^2 . (Ответ 2,5 Ом).

12. Реостат из никелинового провода длиной 40 м и площадью сечения $0,5\text{ мм}^2$. Напряжение на клеммах реостата 80 В. Какой силы ток проходит через реостат? (Ответ: 2,5 А).

13. Сколько метров никелинового провода сечением $0,2\text{ мм}^2$ нужно взять для реостата сопротивлением 30 Ом? (Ответ: 15 м).

14. Аккумулятор до полной разрядки может давать силу тока 2 А на протяжении 20 ч. Какой электрический заряд накапливает такой аккумулятор? (Ответ: 144000 Кл).

15. Сколько электронов проходит через сечение проводника за 1 с, если сила тока равна 1 А? (Ответ: $6 \cdot 10^{18}$ электронов).

2.4. СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

К источнику тока (генератору) можно присоединить несколько электроламп, радиоприёмники, электродвигатели, вольтметры, амперметры и другие приборы. Так как каждый потребитель электрической энергии обладает определённым сопротивлением, то в дальнейшем будем говорить о соединении сопротивлений или проводников. В электрических цепях наиболее простыми

соединениями являются последовательное и параллельное соединение проводников.

Последовательным соединением называется такое соединение проводников, при котором конец одного проводника соединяется с началом другого (рис. 2.3). Ток проходит через все проводники, не разветвляясь.

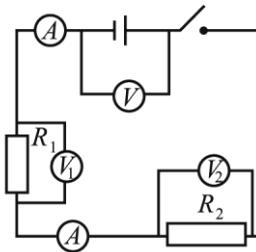


Рис. 2.3. Последовательное соединение проводников

Если включить амперметр в различные участки цепи, то окажется, что ток во всех частях цепи одинаков: $I_1 = I_2 = I$. Для определения напряжения будем подключать вольтметр к каждому участку цепи. Напряжение на источнике тока будет равно сумме напряжений на отдельных участках цепи:

$$U = U_1 + U_2. \quad (2.2)$$

Выясним, чему равно сопротивление цепи. По закону Ома напряжение на отдельных участках цепи:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \quad U = IR_{\text{общ}}.$$

Подставим значения U_1, U_2, U в формулу (2.2). Получим

$$IR_{\text{общ}} = IR_1 + IR_2 \text{ или } R_{\text{общ}} = R_1 + R_2.$$

При последовательном соединении проводников общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных проводников. Найдём напряжение на отдельных участках

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2} \text{ или } \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При последовательном соединении напряжение на участке прямо пропорционально его сопротивлению.

Если $R_1 = R_2 = R$, то $R_{\text{общ}} = R_1 + R_2 = 2R$.

Или в случае n проводников: $R_{\text{общ}} = nR$.

Последовательное соединение проводников не всегда удобно, так как при размыкании цепи в одном из последовательно соединённых участков ток исчезает во всей цепи.

Параллельным соединением называется такое соединение проводников, при котором одни концы всех проводников соединяются в один узел, другие — в другой (рис. 2.4). При параллельном соединении напряжение на каждой из ветвей и на всём разветвлении одинаково: $U_1 = U_2 = U$.

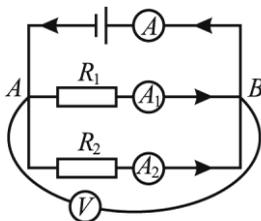


Рис. 2.4. Параллельное соединение проводников

Амперметры в отдельных ветвях в сумме показывают столько ампер, сколько один амперметр, включенный перед разветвлением или после него.

Так как заряды в точке A (или B) не накапливаются и не уничтожаются, то

$$I_{\text{общ}} = I_1 + I_2. \quad (2.3)$$

При параллельном соединении двух проводников ток разветвляется на два тока: I_1 и I_2 , причём ток до и после разветвления равен сумме токов в отдельных ветвях. По закону Ома

$$I_{\text{общ}} = \frac{U}{R_{\text{общ}}}; I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}, \quad (2.4)$$

где $R_{\text{общ}}$ — общее сопротивление при параллельном соединении проводников.

Составим соотношение: $\frac{I_1}{I_2} = \frac{U}{R_1} : \frac{U}{R_2}; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$

При параллельном соединении проводников сила тока в отдельных проводниках обратно пропорциональна сопротивлениям этих проводников.

Подставим значения $I_{\text{общ}}, I_1, I_2$ из формулы (2.4) в формулу

$$(2.3): \quad \frac{U}{R_{\text{общ}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \quad \text{или} \quad \frac{I}{R_{\text{общ}}} = \frac{I}{R_1} + \frac{I}{R_2},$$

но $\frac{I}{R} = k$, где k — проводимость.

Тогда $k_{\text{общ}} = k_1 + k_2$.

При параллельном соединении общая проводимость равна сумме проводимостей отдельных ветвей.

Если $R_1 = R_2 = R$, то $\frac{I}{R_{\text{общ}}} = \frac{I}{R}n$ или $R_{\text{общ}} = \frac{R}{n}$.

Последовательное и параллельное соединения проводников используются в схемах включения электроизмерительных приборов.

Примеры решения задач на расчёт сопротивления, силы тока и напряжения при последовательном и параллельном соединении проводников

Задача 1. Три проводника сопротивлением 3, 4 и 5 Ом включены последовательно в электрическую цепь. Напряжение на концах всего соединения равно 6 В. Определить силу тока в цепи и напряжение на концах каждого проводника.

Дано:	Решение:
$R_1 = 3 \text{ Ом}$	Определяем общее сопротивление проводников: $R_{\text{посл}} = R_1 + R_2 + R_3$;
$R_2 = 4 \text{ Ом}$	$R_{\text{посл}} = 12 \text{ Ом}$.
$R_3 = 5 \text{ Ом}$	
$u_{\text{посл}} = 6 \text{ В}$	
$I = ?$ $u_1 = ?$ $u_2 = ?$	Из формулы закона Ома находим силу тока в цепи:
$u_3 = ?$	

$$I = \frac{u_{\text{посл}}}{R_{\text{посл}}} = \frac{6}{12} = 0,5 \text{ (А)}.$$

Теперь можем определить напряжение на каждом проводнике: $u_1 = IR_1 = 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ (В)}$; $u_2 = IR_2 = 0,5 \cdot 4 = 2 \text{ (В)}$;

$$u_3 = IR_3 = 0,5 \cdot 5 = 2,5 \text{ (В)}.$$

Ответ: сила тока в цепи 0,5 А, напряжение на концах первого проводника 1,5 В, второго — 2 В, третьего — 2,5 В.

Задача 2. Три проводника сопротивлением 2, 4 и 6 Ом соединены параллельно. Определить общее сопротивление разветвления и силу тока в каждом сопротивлении. В сопротивлении 2 Ом проходит ток 10 А.

Дано: $R_1 = 2 \text{ Ом}$ $R_2 = 4 \text{ Ом}$ $R_3 = 6 \text{ Ом}$ $I_1 = 10 \text{ А}$	Решение: Определяем общее сопротивление проводников из формулы: $\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$
$I_2 = ?$ $I_3 = ?$ $R_{\text{пар}} = ?$	Подставим в эту формулу числовые значения и получим:

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{11}{12} \left(\frac{1}{\text{Ом}} \right), \text{ отсюда } R_{\text{пар}} = \frac{12}{11} \approx 1,1 \text{ (Ом)}.$$

Чтобы определить силу тока I_2 и I_3 , запишем закон соотношения силы токов: $\frac{I_1}{I_2}$ и $\frac{I_1}{I_3}$; $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$; $I_2 = \frac{I_1 R_1}{R_2} = \frac{10 \cdot 2}{4} = 5 \text{ (А)}$;

$$\frac{I_1}{I_3} = \frac{R_3}{R_1}; \quad I_3 = \frac{I_1 R_1}{R_3} = \frac{10 \cdot 2}{6} = 3,3 \text{ (А)}.$$

Ответ: сопротивление при параллельном соединении проводников 1,1 Ом, ток во втором сопротивлении — 5 А, а в третьем — 3,3 А.

Задача 3. Напряжение в сети 127 В. Сопротивление лампы 320 Ом. Какой ток идёт в проводящих проводах, если лампы соединены последовательно? Если лампы соединены параллельно?

Дано: $u_{\text{пар}} = u_{\text{посл}} = 127 \text{ В}$ $R_1 = 320 \text{ Ом}$ $n = 2$	Решение: Если лампы соединены последовательно, но, $R_{\text{посл}} = 2 R_1$, а $I_{\text{посл}} = \frac{u_{\text{посл}}}{R_{\text{посл}}}$,
$I_{\text{посл}} = ?$ $I_{\text{пар}} = ?$	получим:

$$I_{\text{посл}} = \frac{u_{\text{посл}}}{2R_1}; \quad I_{\text{посл}} = \frac{127}{2 \cdot 320} = 0,2 \text{ (А)}.$$

Если лампы соединены параллельно

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_1}{2}, \quad \text{то} \quad I_{\text{пар}} = \frac{u_{\text{пар}} \cdot 2}{R_1}.$$

Подставляем числовые значения и получаем

$$I_{\text{пар}} = \frac{2 \cdot 127}{320} = 0,8.$$

Ответ: при последовательном соединении в лампах идёт сила тока 0,2 А; при параллельном — 0,8 А.

Обратите внимание!

1. При последовательном соединении сила тока во всех участках цепи одинакова.

2. Напряжение на концах последовательного соединения равно сумме напряжений на концах отдельных проводников и прямо пропорционально их сопротивлениям.

3. Общее сопротивление при последовательном соединении проводников равно сумме сопротивлений всех проводников.

4. При параллельном соединении напряжение на каждом проводнике и на всём разветвлении одинаково.

5. При параллельном соединении ток до и после разветвления равен сумме токов в отдельных ветках, а токи в отдельных ветках обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей.

6. Величина, обратная общему сопротивлению разветвления, равна сумме величин, обратных сопротивлению каждого проводника.

Слова и словосочетания

последовательное соединение	ветка
разветвление	распределяться
параллельное соединение	узел

☝ *Это интересно!*

На практике часто применяют последовательное и параллельное соединение потребителей и источников электрической энергии. В реальных электрических цепях оба эти типа соединений часто соседствуют.

Подключая к цепи измерительные приборы, необходимо строго соблюдать их полярность. Это делается не только для того, чтобы правильно что-то измерить, но и для того, чтобы не испортить измерительный прибор. Например, внутри вольтметра есть соединительные проводники, и лишь малая доля общего тока проходит через правильно подсоединённый вольтметр.

Необходимо обязательно использовать в электрических устройствах ключ, или выключатель. Чтобы в цепи потёк ток, ключ замыкают, а чтобы прервать ток, ключ размыкают. Ключ может защитить элементы цепи, если что-то соединено неправильно.

Упражнение 2.3

1. Как соединить проводники последовательно? Параллельно?
2. Основываясь на законе сохранения заряда, объясните, почему при параллельном соединении проводников общая сила тока равна сумме токов в отдельных ветвях?
3. Чему равна сила тока при параллельном и последовательном соединении проводников?
4. Чему равно напряжение при параллельном и последовательном соединении проводников?
5. Найти величину сопротивления R_3 , если $I_1 = 9$ А; $I_2 = 3$ А; $R_1 = 6$ Ом; $R_2 = 4$ Ом (рис. 2.5) (Ответ: 3 Ом).
6. Найти величину тока в отдельных проводниках, если $R_1 = 3$ Ом; $R_2 = 2$ Ом; $R_3 = 7,55$ Ом; $R_4 = 2$ Ом; $R_5 = 5$ Ом; $R_6 = 10$ Ом; $U_{AB} = 100$ В (рис. 2.6). (Ответ: 4 А; 6 А; 10 А; 6,25 А; 2,5 А; 1,25 А).

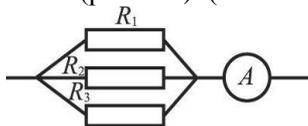


Рис. 2.5

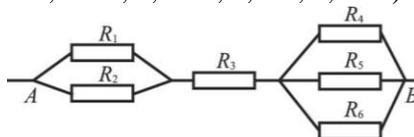


Рис. 2.6

7. Определить сопротивление цепи (рис. 2.7).
(Ответ: 7,45 Ом).

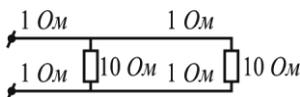


Рис. 2.7

8. 10 одинаковых ламп включены параллельно в сеть с напряжением 127 В. Определить величину тока в общей части цепи, если сопротивление одной лампы 240 Ом. (Ответ: 5,3 А).

9. Общее сопротивление двух проводников при последовательном соединении 50 Ом, при параллельном — 12 Ом. Найти сопротивление каждого проводника. (Ответ: 20 Ом; 30 Ом).

10. Две лампы сопротивлением 240 Ом каждая соединены последовательно и включены в сеть с напряжением 220 В. Чему равна сила тока в каждой лампе? (Ответ: 0,5 А).

11. Два проводника сопротивлением 5 Ом и 20 Ом соединены последовательно. Определить напряжение на концах каждого проводника, если проводники включены в сеть с напряжением 220 В. (Ответ: 44 В; 176 В).

12. Два проводника сопротивлением 5 и 20 Ом соединены параллельно и включены в сеть с напряжением 40 В. Определить силу тока в каждом проводнике. (Ответ: 8 А; 2 А).

2.5. ИСТОЧНИКИ ТОКА. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПОЛНОЙ ЦЕПИ

Для существования электрического тока необходимо иметь источник тока. В источнике тока на электрический заряд действуют сторонние силы. Под действием этих сил заряд приобретает определённую энергию. Эта энергия прямо пропорциональна величине заряда и зависит от внутреннего устройства источника электрической энергии (генератора).

Источники электрической энергии, которые превращают химическую энергию в электрическую, называются *гальваническими элементами* и *аккумуляторами*. Электрические машины-генераторы превращают механическую энергию в электрическую.

Физическая величина, которая равна работе сторонних сил источника тока при перемещении единичного положительного заряда в замкнутой цепи называется *электродвижущей силой* (ЭДС) источника (обозначается ε).

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

Итак, под действием сторонних сил внутри источника тока происходит разделение зарядов, которые накапливаются на полюсах источника тока.

Полная замкнутая электрическая цепь — это цепь, в которую включены внешние сопротивления и источник тока (рис. 2.8).

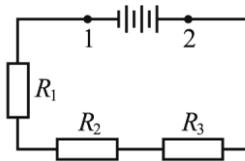


Рис. 2.8. Полная электрическая цепь

Между точками 1 и 2 включён источник тока. Источник тока тоже имеет сопротивление, которое называется *внутренним сопротивлением*.

Напряжение во внешней части цепи (на участке R_1, R_2, R_3) обозначим U , напряжение на внутреннем сопротивлении — u . По закону Ома для участка цепи

$$U = IR, \quad u = Ir.$$

Полное напряжение

$$U + u = \varepsilon \quad \text{или} \quad U + u = IR + Ir = I(R + r),$$

поэтому

$$U + u = \varepsilon = I(R + r). \tag{2.6}$$

Электродвижущая сила источника равна сумме напряжений во внешней и внутренней частях цепи: $\varepsilon = U + u$.

Из формулы (2.6) получим выражение закона Ома для полной цепи:

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

Сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе источника тока и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи.

При разомкнутой цепи ток внутри источника не проходит, поэтому напряжение внутри источника тока равно нулю: $u = 0$, тогда $\varepsilon = U$, т.е. ЭДС равна разности потенциалов полюсов источника тока (напряжение на зажимах) при разомкнутой цепи. ЭДС (как и разность потенциалов) измеряется в вольтах. Для измерения ЭДС можно подключить вольтметр к зажимам источника тока при разомкнутой цепи, и он покажет напряжение, приблизительно равное значению ЭДС.

Слова и словосочетания

электродвижущая сила	разомкнутая цепь
гальванический элемент	аккумулятор
сторонние силы	внешний
полная цепь	зажим

Упражнение 2.3

1. Что называется электродвижущей силой?
2. Как называются источники электрической энергии, которые превращают химическую энергию в электрическую?
3. Сформулировать закон Ома для полной цепи.

2.6. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

При последовательном соединении (рис. 2.9, а) элементов положительный полюс каждого элемента соединяется с отрицательным полюсом следующего. Общая ЭДС батареи в этом случае равна сумме ЭДС отдельных элементов. Общее внутреннее сопротивление равно сумме внутренних сопротивлений отдельных элементов

$$\varepsilon_{\text{бат}} = \varepsilon n; r_{\text{бат}} = rn.$$

$$\text{Сила тока } I_{\text{посл}} = \frac{\varepsilon n}{R + rn}.$$

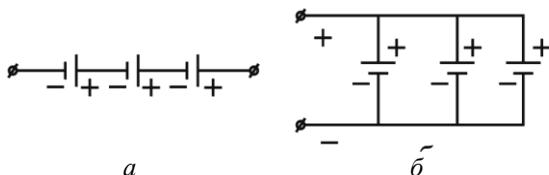


Рис. 2.9. Соединение источников тока:
a — последовательное; *б* — параллельное

При параллельном соединении (рис. 2.9, *б*) положительные полюсы элементов соединяются между собой. При одинаковых ЭДС отдельных элементов, общая ЭДС батареи равна ЭДС одного элемента. Общая внутренняя проводимость равна сумме внутренних проводимостей отдельных элементов: $k_{\text{бат}} = kn$. Общее внут-

реннее сопротивление батареи $r_{\text{бат}} = \frac{r}{n}$, а сила тока $I_{\text{нар}} = \frac{\varepsilon}{R + \frac{r}{n}}$.

При смешанном соединении элементов в батарею общая сила тоже равна

$$I_{\text{смеш}} = \frac{n\varepsilon}{R + \frac{nr}{k}},$$

где n — количество последовательно соединенных элементов; k — количество параллельных групп.

2.7. ДОБАВОЧНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ К ВОЛЬТМЕТРУ

С помощью вольтметра можно измерять напряжение на концах какого-то проводника. Чтобы расширить пределы измерения данного вольтметра, последовательно с ним включают добавочное сопротивление (рис. 2.10). При последовательном их соединении общее сопротивление вольтметра и добавочного сопротивления будет равно сумме их сопротивлений. Падение напряжения на вольтметре и добавочной катушке будет прямо пропорционально

их сопротивлениям, т.е. $\frac{U_r}{U_v} = \frac{r}{R}$.

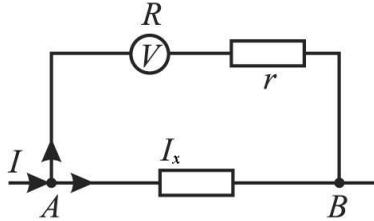


Рис. 2.10. Схема включения добавочного сопротивления к вольтметру

Так как для данного вольтметра сопротивление R является постоянной величиной, то для измерения необходимого напряжения можно подобрать соответствующее добавочное сопротивление. Его значение должно быть во столько раз больше сопротивления вольтметра R , во сколько раз падение напряжения на данном добавочном сопротивлении больше падения напряжения на вольтметре $r = \frac{U_r}{U_v} R$.

Рассмотрим, как влияет общее сопротивление вольтметра и добавочной катушки на сопротивление участка цепи, к которой подключен вольтметр ($R' = R + r$).

По данному участку цепи течёт ток I_x (см. рис. 2.10)

$$I_x = I - \frac{U}{R'}, \quad (2.7)$$

где I — общий ток; $\frac{U}{R'}$ — ток, протекающий через вольтметр с катушкой от разветвления в точке A .

Чтобы ток через вольтметр с добавочной катушкой проходил как можно меньше (т.е. почти не искажал тока в цепи), $\frac{U}{R'}$ в уравнении (2.7) должно быть как можно меньше, т.е. необходимо достаточно большое сопротивление вольтметра с катушкой.

Общее сопротивление участка цепи и вольтметра с катушкой определим по формуле $r_x = \frac{u}{I - \frac{u}{R'}}$, что доказывает необходи-

мость выбора достаточно большого R' . В этом случае общее сопротивление участка цепи с прибором не очень отличается от сопротивления данного участка.

Слова и словосочетания

разветвление	искажать
добавочное сопротивление	падение напряжения

Упражнение 2.4

1. Является ли источник тока источником электрических зарядов в цепи? Объяснить.
2. Почему проводник, по которому идёт ток, нагревается?
3. Какие условия существования электрического тока?
4. Существует ли электрическое поле между полюсами источника электрической энергии, не включённого в цепь? Изменится ли конфигурация линий напряжённости этого поля при замыкании источника энергии?
5. Почему металлические проводники обладают электронной проводимостью тока?
6. ЭДС источника энергии 12 В. Какой физический смысл этого выражения?
7. Какое техническое направление постоянного тока на внешнем и внутреннем участках полной цепи?
8. Для чего применяется добавочное сопротивление?

2.8. ШУНТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Для измерения силы тока в цепь последовательно включают амперметр. Чтобы сила тока в цепи при измерении существенно не изменялась, амперметры изготавливают с малым внутренними сопротивлениями. Допустим, что амперметр рассчитан на максимальный ток I_{\max} , требуется измерить большую величину тока. В этом случае параллельно амперметру (рис. 2.11) присоединяют ма-

лое сопротивление, называемое шунтом (от английского «шунт» — добавочный путь). Если сопротивление гораздо меньше сопротивления амперметра, то по нему пройдёт большая часть тока. Пусть R в n раз больше чем r , т.е. $\frac{R}{r} = n$. При параллельном соединении токи в отдельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям этих ветвей $\frac{I_{\text{ш}}}{I_a} = \frac{R}{r} = n$ или $I_{\text{ш}} = I_a n$. Полный ток I в цепи равен $I = I_a + I_{\text{ш}} = I_a + I_a n = I_a (n + 1)$ или $I_a = I \frac{1}{n + 1}$.

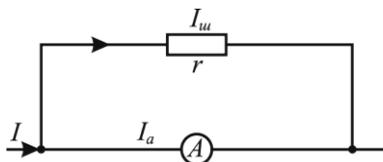


Рис. 2.11. Шунтирование амперметра

Величина тока в амперметре в $(n + 1)$ раз меньше, чем величина тока I в главной цепи. Благодаря шунту измерим данным амперметром токи, которые в $(n + 1)$ раз больше токов, на которые рассчитан амперметр.

Цена каждого деления амперметра при этом увеличивается в $(n + 1)$ раз. Если, например, без шунта определенное отклонение стрелки амперметра соответствовало току в 1 А и сопротивление шунта в 4 раза меньше сопротивления амперметра, то при наличии шунта то же отклонение соответствует току в 5 А. Обычно подбирают шунты так, чтобы цена деления увеличивалась в 10, 100, 1000 раз. Для этого сопротивление шунта должно составлять $\frac{1}{9}$, $\frac{1}{99}$, $\frac{1}{999}$ от сопротивления амперметра.

Для измерения напряжения на данном участке цепи параллельно этому участку включают вольтметр. Через вольтметр проходит некоторый ток I_v , ответвлённый от основной цепи. Чтобы сила тока на участке цепи, где измеряют напряжение, значительно

не изменилась, сопротивление R_B вольтметра должно быть не большим по сравнению с сопротивлением данного участка. Если необходимо измерить напряжение U , которое в k раз больше напряжения U_B , указанного на шкале вольтметра, то последовательно с вольтметром включают добавочное сопротивление R_d . Отношение $\frac{U}{U_B} = k$ называется *коэффициентом расширения пределов измерения вольтметра*.

Слова и словосочетания

шунт	цена деления
шунтирование	измерительный прибор

Упражнение 2.5

1. Величина тока в цепи гальванического элемента с ЭДС 1,8 В равна 0,1 А. Падение напряжения на внешней части цепи 1,6 В. Найти сопротивление внешней части цепи и внутреннее сопротивление элемента. (Ответ: 16 Ом, 2 Ом).

2. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление батареи, если ЭДС одного элемента 1,6 В и внутреннее сопротивление 0,6 Ом. (Ответ: 5,4 В, 0,9 Ом).

3. Первый гальванический элемент имеет ЭДС 2 В и внутреннее сопротивление 0,8 Ом. Последовательно соединён другой элемент, имеющий ЭДС 1,5 В и внутреннее сопротивление 1,2 Ом. Сопротивление внешней части равно 5 Ом. Определить напряжение на зажимах элементов. (Ответ: 2,5 В; 1,6 В; 0,9 В).

4. Батарея аккумуляторов с ЭДС 4 В и внутренним сопротивлением 1,2 Ом подключена для зарядки к источнику с напряжением 10 В. Какое добавочное сопротивление следует включить в цепь, чтобы зарядный ток был равен 1 А? (Ответ: 5 Ом)

2.9. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ТОКА

Электрическая энергия легко превращается в другие виды энергии, поэтому применение электрического тока чрезвычайно разнообразно. Электрическая энергия превращается в тепловую, механическую, химическую, электромагнитную энергии. Мерой превращения электрической энергии в другие виды энергии явля-

ется работа тока. Работу тока на участке цепи можно найти по формуле $A = Uq$. Величину напряжения легко измерить вольтметром. Но для измерения количества электричества (заряда) нет удобного прибора, поэтому q выражают через силу тока: $q = It$. Подставим значение q в формулу работы и получим

$$A = IUt \text{ или } A = I^2Rt, \quad (2.8)$$

так как $U = IR$. Работу тока можно выразить через напряжение

$$A = \frac{U^2}{R}t. \quad (2.9)$$

Полная работа, совершаемая источником тока, зависит от его ЭДС и может быть найдена по формуле $A = \varepsilon It$.

Мощность тока P — это величина, которая характеризует скорость работы тока в электрической цепи

$$P = \frac{A}{t}. \quad (2.10)$$

Если заменить работу тока A в формуле (2.10) её значением из формул (2.8, 2.9), то получим: $P = IR$; $P = I^2R$; $P = \frac{U^2}{R}$; $P = \varepsilon I$.

Для измерения работы электрического тока применяют счётчик электрической энергии, а для измерения мощности ваттметр (рис. 2.12).

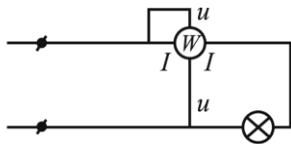


Рис. 2.12. Схема включения ваттметра

 Это интересно!

Павел Николаевич Яблочков (1847 – 1894) — российский электротехник. Исследовал электричество как источник света. Изобрёл дуговую лампу — «свечу Яблочкова». Положил начало первой применимой на практике системе электрического освещения. Занимался созданием электрических машин.

2.10. НАГРЕВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ – ЛЕНЦА

Русский учёный Э.Х. Ленц и английский физик Д. Джоуль независимо друг от друга исследовали на опыте нагревание проводников током и открыли закон Джоуля—Ленца: *количество теплоты, которое выделяется в проводнике, равно работе электрического тока*

$$Q = A.$$

Выделенная током теплота зависит от сила тока и сопротивления участка цепи:

$$Q = I^2 Rt. \quad (2.11)$$

Формулу (2.11) можно применять при определении количества теплоты, выделенной током на любом участке цепи, независимо от происходящих в нем процессов при последовательном соединении проводников. Формулу можно преобразовать

$$Q = IUt \text{ или } Q = \frac{U^2}{R} t. \quad (2.12)$$

Формулу (2.12) применяют при параллельном соединении проводников. Если воспользоваться формулой мощности $P = IU$ то получим

$$Q = Pt \quad (2.13)$$

Формулы (2.12, 2.13) можно применять только тогда, когда вся электрическая энергия на данном участке цепи превращается во внутреннюю энергию данного участка, например, в нагревательных приборах. В электродвигателе не вся энергия расходуется на нагревание. Часть электрической энергии превращается в механическую.

Коэффициент полезного действия (КПД) потребителя электрической энергии определяют по формуле

$$\eta = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{затр}}} \cdot 100\% \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{затр}}} \cdot 100\%.$$

Слова и словосочетания

нагревание проводника
потребитель энергии

количество теплоты
электродвигатель

 *Это интересно!*

Эмилий Христианович Ленц (1804 – 1865) — знаменитый русский физик, сыграл весьма важную роль в развитии учения об электричестве. Он существенно дополнил законы электромагнитной индукции, лёгшие в основу современной электротехники. Через год после их опубликования Э. Х. Ленц установил закон, однозначно определяющий направление индуцированных токов во всех возможных случаях, указал на тесное взаимоотношение магнитно-электрических и электромагнитных явлений, а также изучил условия, от которых зависит сила всякого индуцированного тока. В истории физики научным трудам его всегда будет отводиться почётное место. Многие его научные исследования относятся к физической географии (о температуре и солёности моря, об изменчивости уровня Каспийского моря, о барометрическом измерении высот, об измерении магнитного наклона и напряжённости земного магнетизма и др.). Но главным образом он работал в области электромагнетизма.

Джеймс Прескотт Джоуль (1818—1889) — английский физик. Первые работы Джоуля, относящиеся к 1838 - 40 гг., касаются исследования законов электромагнетизма. Он внёс значительный вклад в исследование электромагнетизма и тепловых явлений, в создание физики низких температур, в обоснование закона сохранения энергии. Изучал природу тепла, и обнаружил её связь с механической работой. Это привело к теории сохранения энергии, что в свою очередь привело к разработке первого закона термодинамики. В честь Джоуля названа единица измерения энергии — джоуль.

Джоуль работал с лордом Кельвином над абсолютной шкалой температуры, делал наблюдения над магнитострикцией, открыл связь между током, текущим через проводник с определённым сопротивлением, и выделяющемся при этом теплом. Этот закон получил название закона Джоуля – Ленца (в 1842 независимо этот закон был открыт русским физиком Э.Х.Ленцем).

2.11. ВЫДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ТОКОМ В ПОТРЕБИТЕЛЯХ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЯХ

Пусть два потребителя соединены последовательно (рис. 2.13).

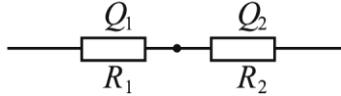


Рис. 2.13. Последовательное включение потребителей электрической энергии в цепь

В каком из них за одинаковое время прохождения тока выделится большее количество теплоты? При последовательном соединении $I_1 = I_2 = I$. Количество теплоты, которое выделяется в каждом проводнике, равно: $Q_1 = I^2 R_1 t$ и $Q_2 = I^2 R_2 t$. Разделим Q_1 на Q_2 и сократим на I и t . Получим $\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}$.

Количество теплоты, которое выделяется в отдельных проводниках при последовательном соединении, прямо пропорционально сопротивлениям проводников.

При параллельном соединении (рис. 2.14) $U_1 = U_2 = U$. Из формулы (2.12) $Q_1 = \frac{U^2 t}{R_1}$ и $Q_2 = \frac{U^2 t}{R_2}$. Если разделить Q_1 на Q_2 , получим $Q_1 : Q_2 = R_2 : R_1$.

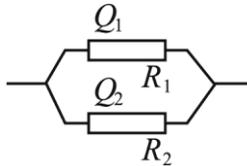


Рис. 2.14. Параллельное включение потребителей электрической энергии в цепь

Количество теплоты, которое выделяется током при параллельном соединении проводников, обратно пропорционально сопротивлениям этих проводников.

Теперь выясним зависимость мощности нагревателей от вида включения в цепь. Пусть нагреватель имеет мощность P .

При включении нагревателя в цепь в нём выделяется количество теплоты $Q = Pt$ или $Q = \frac{U^2}{R}t$. Если в сеть включить последовательно два таких нагревателя (см. рис. 2.13), то напряжение на каждом из них уменьшится вдвое. Выделяющееся количество теплоты прямо пропорционально мощности каждого нагревателя:

$P' = \frac{U^2}{4R}$ ($P' = P : 4$). Два нагревателя будут иметь мощность

$P_{\text{посл}} = 2P' = \frac{U^2}{2R}$ или $P_{\text{посл}} = \frac{P}{2}$, т.е. в два раза меньше, чем имеет один нагреватель, включённый в эту цепь.

При параллельном соединении (см. рис. 2.14) напряжение на каждом из нагревателей не изменяется. Мощность одного нагревателя равна $P = \frac{U^2}{R}$, а двух — $P_{\text{пар}} = 2P = \frac{2U^2}{R}$, т.е. мощность двух параллельно включённых нагревателей равна удвоенной мощности.

 *Это интересно!*

Александр Николаевич Лодыгин (1847 – 1923) — российский электротехник. Занимался изобретением летательных машин. Построил угольную лампу накаливания — прообраз будущих электрических лампочек. Один из основателей электротермии — прикладной науки о преобразовании электрической энергии в тепловую.

Упражнение 2.6

1. Сформулировать закон Джоуля—Ленца.
2. От чего зависит выделенная при нагревании проводников ток ток теплота?

1. К параллельному участку цепи с сопротивлением 10 Ом подключён вольтметр. Он показывает напряжение 5 В. Определить мощность, которую потребляет данный участок цепи. (Ответ: 2,5 Вт).

2. Кинопроекторная лампа мощностью 300 Вт рассчитана на напряжение 110 В. Определить величину дополнительного сопротивления, при помощи которого эту лампу можно включить в сеть с напряжением 127 В. (Ответ: 6 Ом).

3. Лифт массой 1,2 т поднимается на 15 м за 0,5 мин. Напряжение на зажимах мотора 220 В, его КПД 90%. Найти мощность, потребляемую мотором; ток в моторе; расход энергии при одном подъёме. (Ответ: 6,5 кВт; 30 А; 0,54 кВт.ч).

2.12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

Из химии известно, что распад молекул вещества на ионы под действием растворителя называется электролитической диссоциацией. Диссоциация молекул на ионы может быть получена при растворении, при высокой температуре и другими факторами. Прохождение электрического тока через раствор непосредственно не меняет степени его диссоциации.

Если, например, в раствор серной кислоты опустить две пластины и соединить их с источником тока, то между пластинами образуется электрическое поле. Под действием сил этого поля ионы раствора начинают двигаться направленно (рис. 2.15): положительные ионы движутся к отрицательно заряженной пластине, а отрицательные ионы — к положительно заряженной пластине.

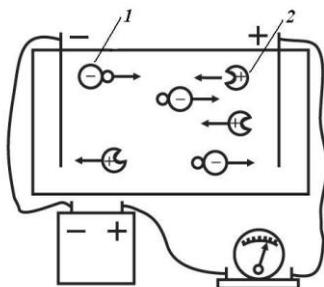


Рис. 2.15. Прохождение электрического тока через электролит:
1 — ион SO_4 ; 2 — ион водорода

При подходе к пластинам ионы осаждаются на них. Электролизом называется прохождение электрического тока через проводники с ионной проводимостью, химические превращения веществ

и выделение ионов на электродах. На практике часто применяют электролиз, при котором анод активен, т.е. реагирует с электролитом и растворяется в нём. В этом случае вещество выделяется только на катоде. При таком электролизе берут электролит, содержащий соли того металла, из которого сделан сам анод.

Слова и словосочетания

электролитическая диссоциация	электролиз
ионная проводимость	электролит

2.13. ЗАКОНЫ ФАРАДЕЯ

От чего зависит количество вещества, которое выделяется при электролизе? Впервые на этот вопрос ответил Фарадей. Количество выделяющегося на катоде вещества зависит от химических свойств вещества.

Электрохимический эквивалент k — это величина, которая характеризует зависимость количества выделяющегося при электролизе вещества от его химических свойств.

Электрохимический эквивалент вещества измеряется массой вещества, выделяющегося на электроде при прохождении через электролит одного кулона электричества: $k = \frac{m}{q}$.

Единица электрохимического эквивалента в СИ — килограмм на кулон: $[k] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

Величину электрохимического эквивалента определим на опыте, если взвесим катод до и после электролиза, а количество электричества q определим по формуле $q = It$. Массу вещества, выделяющегося на катоде, найдём по формуле

$$m = kq \text{ или } m = kIt. \quad (2.14)$$

Формула (2.14) выражает первый закон Фарадея: *масса вещества, выделяющегося на катоде, прямо пропорциональна силе тока, прошедшего через электролит, времени прохождения этого тока и зависит от рода вещества.*

Разделим молярную массу вещества A на валентность этого вещества n и получим килограмм-эквивалент (кг-экв) данных ио-

нов. Например, для меди $\frac{A}{n} = \frac{63,54}{2} = 31,8$ кг-экв, для

$$NO_3 \frac{A}{n} = 62 \text{ кг-экв.}$$

Фарадей впервые произвёл опыты по выделению 1 кг-экв любого вещества. Оказалось, что для выделения на катоде 1 кг-экв любого вещества необходимо одинаковое количество электричества, равное F .

$$F = 9,65 \cdot 10^7 \text{ Кл.}$$

Число F называется *числом Фарадея*. Если разделим массу m вещества, выделившегося на катоде, на килограмм-эквивалент

(химический эквивалент), $\frac{A}{n}$ то получим число химических экви-

валентов: $m : \frac{A}{n}$. Это же число химических эквивалентов получим,

если разделим количество электричества q , прошедшего через

электролит, на число Фарадея $\frac{q}{F}$. Приравнивая последние два от-

ношения, получим:

$$m : \frac{A}{n} = q : F \text{ или } m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} q. \quad (2.15)$$

Обозначим $\frac{1}{F} = C$; $\frac{A}{n} = x$ и подставим в формулу (2.15), по-

лучим $m = cxq$. По закону Фарадея $m = kq$. Объединяя две последние формулы, получим $kq = cxq$ или $k = cx$ (формула второго закона Фарадея).

Второй закон Фарадея формулируется так: ***электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.***

Формула (2.15) объединяет первый и второй законы Фарадея.

В табл. 2.2 приведены значения некоторых электрохимических эквивалентов.

Таблица 2.2

Вещество	$k, \frac{\text{мГ}}{\text{Кл}}$	Вещество	$k, \frac{\text{мГ}}{\text{Кл}}$
Серебро	1,118	Цинк	0,3388
Медь	0,3924	Свинец	1,074

Слова и словосочетания

электрохимический эквивалент	молярная масса
химический эквивалент	катод
электрод	анод
объединить	приравнять

 Это интересно!

Майкл Фарадей (1791—1867) — английский физик и химик, член Лондонского королевского общества (с 1824 г.). Научные исследования начал в области химии. Огромны его заслуги в области физики. Проводил исследования по электромагнетизму. Создатель учения об электромагнитном поле. Ввел понятие диэлектрической проницаемости. Член многих академий наук и научных обществ. Иностраный член Петербургской АН (с 1831 г.). В 1833—1834 годах учёный установил законы электролиза. Рядом опытов он доказал, что электростатическая индукция зависит от среды. Он заменил проводящую жидкость в электролитической ванне непроводящей. Металлические пластины, опущенные в нее, образуют конденсатор. Оказалось, что емкость конденсатора изменяется в зависимости того, какая именно жидкость находится между пластинами. С емкостью конденсатора связана какая-то определенная деформация. Понятие деформации среды Фарадей положил в основу учения об электричестве. Создал первую лабораторную модель электродвигателя, открыл явление электромагнитной индукции и установил его законы. Ввёл новые физические понятия, главным из которых является понятие поля, описываемого электрическими и магнитными силовыми линиями.

Упражнение 2.7

1. Что называется электролитической диссоциацией?
2. От чего зависит количество вещества, которое выделяется при электролизе?
3. Сформулировать первый закон Фарадея.
4. Сформулировать второй закон Фарадея.
5. При электролизе раствора серной кислоты за 50 мин выделилось 0,3 г водорода. Определить мощность, расходуемую на нагревание электролита, если сопротивление его 0,4 Ом. (Ответ: 37 Вт).
6. Какое количество никеля выделится при электролизе при прохождении 100 Кл электричества? Атомная масса никеля 58,68, его валентность 2. (Ответ: 30,4 мг)
7. Какое количество серебра выделится при электролизе раствора азотнокислого серебра в течение 1 ч? Сопротивление ванны 1,2 Ом, напряжение на зажимах ванны 1,5 В. (Ответ: 2,35 г).
8. Как надо соединить два проводника одинакового сопротивления, чтобы при включении в осветительную сеть получить больше теплоты?
9. Сколько времени будет нагреваться 1,5 л воды от 20°C до кипения в электрическом чайнике мощностью 600 Вт, если его КПД 80%? (Ответ: 17 мин.).
10. Дюговая лампа горит под напряжением 50 В и потребляет мощность 500 Вт. Какое количество тепла выделяется в подводящих проводах за 10 мин работы лампы? Расстояние от генератора до лампы 100 м, проводка выполнена медным проводом площадью поперечного сечения 2 мм². (Ответ: 102900 Дж).
11. Почему при прохождении тока через электролиты происходит перемещение и отложение веществ на электродах, а при прохождении тока по металлическим проводникам этого не происходит?
12. Какой физический смысл постоянной Фарадея?
13. Что такое электролит? Почему сопротивление электролита уменьшается при повышении температуры?
14. Почему в водных растворах солей, кислот и щелочей происходит распад молекул растворимых веществ на ионы?

2.14. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

Все газы при нормальных условиях — хорошие изоляторы, так как в них отсутствуют свободные электрические заряды.

Атомы и молекулы газов являются нейтральными, незаряженными частицами. Чтобы сделать газ проводящим, нужно ввести в него или создать в нём свободные носители зарядов — заряженные частицы. При этом возможны два случая:

— заряженные частицы создаются действием ионизатора или вводятся в газ извне — в этом случае электропроводимость газов называется *несамостоятельной*;

— заряженные частицы в газе создаются действием самого электрического поля между электродами — в этом случае электропроводимость называется *самостоятельной*.

Ионизаторами для газа могут служить: высокая температура, лучи, испускаемые радиоактивными веществами, ультрафиолетовые лучи, рентгеновские лучи и т.д. Под действием этих ионизаторов в газе образуются ионы. Процесс образования ионов в каком-либо газе называется *ионизацией* этого газа. Ионизация состоит в отрыве электронов от молекулы, благодаря чему она становится ионом. Освободившийся электрон сам становится свободным носителем заряда. Во многих случаях электрон «прилипает» к какой-нибудь нейтральной молекуле, которая становится ионом.

Электрический ток в газах — это направленное движение ионов и электронов.

Если присоединить батарею (рис. 2.16) к обкладкам конденсатора, между которыми находится воздух, то между ними образуется электрическое поле.

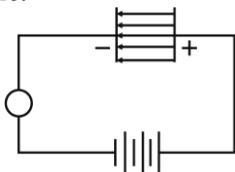


Рис. 2.16. Возникновение зарядов между обкладками конденсатора при наличии ионизатора

Но стрелка гальванометра не отклонится, т.е. электрический ток через конденсатор не пойдёт. Если поместить между обкладками горящую свечу, то стрелка сразу отклонится. Следовательно, в

воздухе появились свободные заряды. Если убрать свечу, то почти сразу же прекращается ток в цепи.

Таким образом, ионы в газе долго не существуют, т.е. положительные ионы и свободные электроны, совершая тепловое движение, снова соединяются в нейтральные молекулы газа. Процесс образования нейтральных молекул из ионов газа и электронов называется *рекомбинацией*.

При действии постоянного ионизатора и постепенном повышении напряжения между обкладками конденсатора в цепи ток сначала растёт пропорционально напряжению, затем его рост замедляется и, наконец, наступает момент, когда ток становится постоянным, несмотря на дальнейшее повышение напряжения. Максимальный ток, величина которого уже не зависит от напряжения, называется *током насыщения*. При небольших напряжениях ток подчиняется закону Ома, а при более высоких наблюдается отклонение от этого закона. Это объясняют так. При небольших напряжениях ионы под действием электрического поля движутся между обкладками конденсатора медленно, и большинство из них, прежде чем достигнуть обкладки, рекомбинирует, поэтому немного ионов доходит до обкладок конденсатора.

График (рис. 2.17) на участке *AB* имеет вид прямой, т.е. закон Ома выполняется. Начиная с некоторого момента (обычно несколько десятков вольт) кривая загибается и переходит в горизонтальную прямую. На участке *BB* ток сохраняет постоянное значение, несмотря на рост напряжения, — это ток насыщения.

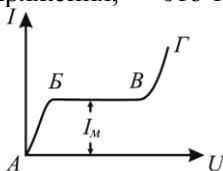


Рис. 2.17. Зависимость тока в цепи от напряжения между обкладками

На участке *BB* рекомбинация ионов не успевает произойти, так как скорость ионов большая, и они за короткое время без столкновений доходят до обкладок. Когда напряжение достигает десятков тысяч вольт на сантиметр, становится возможной иониза-

ция молекул газа толчком. Скачок тока показывает, что количество ионов резко возросло. Причиной этого является само электрическое поле: оно сообщает ионам большие скорости, т.е. большую энергию. При столкновении таких ионов с нейтральными молекулами последние разбиваются на ионы. Проводимость из несамостоятельной стала самостоятельной. Огромное количество ионов, возникающих при ионизации толчком, называется *лавиной ионов*. Её образование сопровождается возникновением искры и резким увеличением тока.

Изучение электрического разряда в воздухе при атмосферном давлении позволило установить три его типа: тихий разряд, искровой разряд, электрическая дуга.

Тихий разряд — это разряд в газе, который не сопровождается световым или звуковым эффектом. Тихий разряд происходит при напряжении, соответствующем току насыщения, или при более низком напряжении.

Искровой разряд — это прерывистый разряд в газе, происходящий при высоком напряжении между электродами. Он сопровождается световым и тепловым эффектами.

Электрическая дуга — это непрерывный разряд в газе, происходящий при высоком напряжении между электродами.

Слова и словосочетания

ионизатор	прилипать
электропроводность	рекомбинировать
лучи	ток насыщения
радиоактивные вещества	искровой разряд
рентгеновские лучи	электрическая дуга

Упражнение 2.8

1. Что такое самостоятельная и несамостоятельная проводимость газа?
2. Почему все газы при нормальных условиях являются изоляторами?
3. Какие внешние факторы могут оказывать влияние на повышение электрической проводимости газа при нормальных условиях?

3. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА И ЕГО ДЕЙСТВИЕ

3.1. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

Простые электрические и магнитные явления известны людям очень давно. Уже за 600 лет до нашей эры греки знали, что магнит притягивает к себе железо, а натёртый янтарь — легкие предметы, нитки. Чёткое разграничение этих явлений сделал английский естествоиспытатель Уильям Джильберт, который в 1600 г выпустил книгу с описанием многочисленных своих опытов. Он указал на ряд существенных различий между электрическими и магнитными притяжениями и ввел термин «электричество». Однако ряд фактов указывал на то, что электрические и магнитные явления тесно связаны друг с другом. Факты наводили на мысль, что электрический ток обладает определёнными магнитными свойствами. Эти свойства удалось обнаружить на опыте датскому физику Г. Х. Эрстеду (1777–1851) в 1820 г. Основной опыт Эрстеда следующий (рис. 3.1).

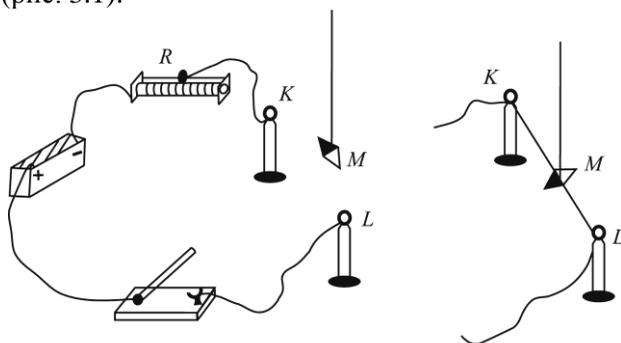


Рис. 3.1. Опыт Эрстеда с магнитной стрелкой

Над неподвижным проводом KL , который располагался вдоль меридиана, т.е. в направлении север—юг, подвешена на тонкой нити параллельно проводу магнитная стрелка M . При замыкании ключа по проводу проходит ток и стрелка поворачивается, она стремится установиться под прямым углом к проводу. Этот фундаментальный опыт показывает, что в пространстве вокруг проводника с током действуют силы, которые вызывают движение магнитной стрелки. Такие силы назвали магнитными. Эрстед проводил

опыты с проводами, выполненными из платины, золота, серебра, латуни и железа, с оловянными и свинцовыми полосами. Вместо металлов (с проводимостью электронного характера) можно взять трубку с электролитом или трубку, в которой происходит разряд в газе. Какова бы ни была природа проводника, по которому течёт ток, вокруг проводника всегда создается магнитное поле. *Магнитным полем* называют то состояние пространства, которое проявляет себя действием магнитных сил. Магнитное поле — неотделимый спутник всякого электрического тока.

Свойства магнитного поля можно изучать при помощи магнитной стрелки или при помощи пробного тока. Пробный ток — это замкнутый контур небольших размеров, например, маленький виток (рис. 3.2, *а*) или маленькая рамка с током (рис. 3.2, *б*). Опыт показывает, что магнитное поле оказывает ориентирующее действие на рамку с током, т.е. рамка с током поворачивается в магнитном поле.

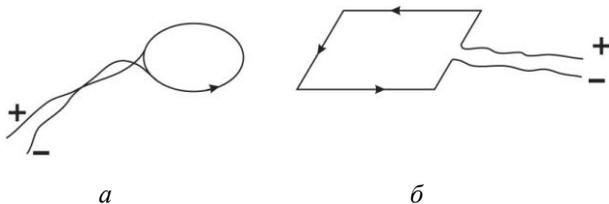


Рис. 3.2. Пробный ток: *а* — виток; *б* — рамка

Ориентирующее действие магнитного поля на рамку с током можно использовать для определения направления магнитного поля. За направление магнитного поля принимают направление нормали к плоскости рамки с током. Направление нормали определяют по правилу винта: винт вращают по направлению тока в рамке, поступательное движение винта указывает направление нормали (рис. 3.3).

Если рядом с рамкой с током поместить магнитную стрелку, то её северный полюс будет направлен так, как нормаль \vec{n} к рамке. Магнитная стрелка выполнена из естественного магнита — железной руды. Эта руда имеет свойство притягивать предметы из железа, никеля, кобальта и их сплавов.

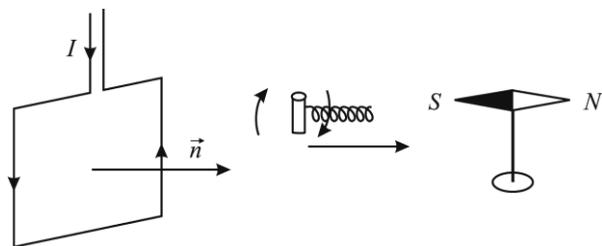


Рис. 3.3. Правило винта

Из естественного магнита делают прямые и подковообразные магниты (рис. 3.4), стрелку для компаса.

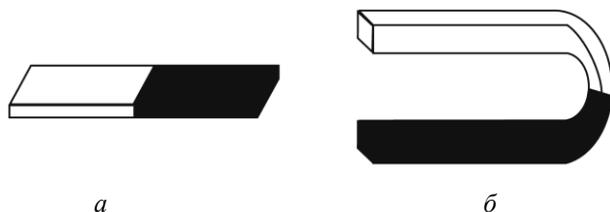


Рис. 3.4. Магниты: *a* — прямой (полосовой); *б* — подковообразный

Это постоянные магниты. Они имеют два полюса: северный *N* и южный *S*. Опыт показывает, что одноимённые полюса отталкиваются, а разноимённые — притягиваются друг к другу. Постоянная ориентация магнитной стрелки компаса говорит о существовании магнитного поля Земли.

Слова и словосочетания

магнитное поле	пробный ток
правило винта	магнитная стрелка
полюс магнита	компас
рамка с током	нормаль
северный	южный

 *Это интересно!*

Ганс Кристиан Эрстед (1777—1851) — датский физик, иностранный почётный член Петербургской АН (1830). Открыл магнитное действие электрического тока. Это открытие привело к появлению новой области физики — электромагнетизму. Научные

интересы Эрстеда были весьма разносторонними — они охватывали электричество, акустику, молекулярную физику, химию. Глубоко проникнувшись идеей о единстве сил природы, он еще в 1812–1813 высказал мысль о возможной связи электричества и магнетизма, а в 1821 одним из первых предположил, что свет представляет собой электромагнитное явление. Связь между электрическим током и магнетизмом Эрстед обнаружил в 1820, когда во время лекционной демонстрации заметил действие тока на магнитную стрелку. Построил первый термоэлемент. Занимался исследованиями свойств жидкостей и газов, акустическими опытами. Одним из первых высказал мысль о свете как об электромагнитном явлении. Эрстед вел большую просветительскую деятельность, организовал в 1824 Общество по распространению естествознания, создал первую в Дании физическую лабораторию. Именем учёного названа единица измерения напряжённости магнитного поля.

Упражнение 3.1

1. Что называется магнитным полем?
2. Как определить направление магнитного поля?
3. Какие два полюса имеют постоянные магниты?
4. Как ведут себя разноимённые и одноимённые полюса магнитов?

3.2. МАГНИТНЫЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКОВ И ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Открытие Эрстеда вызвало большой интерес среди всех физиков. Оно послужило началом для проведения замечательных исследований в этой области и привело к ряду открытий.

Рассмотрим некоторые явления.

В опыте Эрстеда ток действует на магнит, но, возможно, существует обратное действие, действие магнита на проводник с током. Проведём опыт (рис. 3.5).

Параллельно постоянному полосовому магниту подвесили проводник KL (на гибких металлических шнурах). При замыкании цепи по проводнику KL проходит ток, и он поворачивается перпендикулярно магниту.

Другой опыт изображён на рис. 3.6.

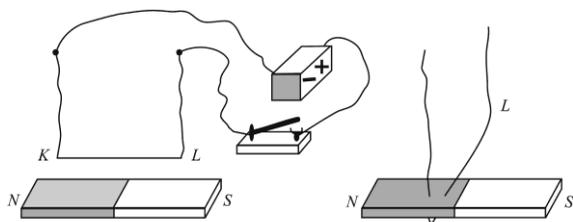


Рис. 3.5. Проводник с током поворачивается над прямым магнитом

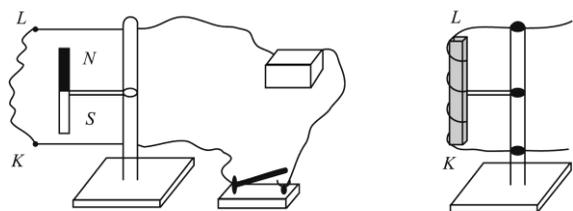


Рис. 3.6. Проводник с током обвивает полосовой магнит

Гибкий проводник KL подвешен рядом с намагниченным стержнем NS . Когда по проводнику идёт ток, то на каждый участок гибкого провода действует сила, которая стремится установить этот участок перпендикулярно к магниту. Под действием этих сил проводник располагается вокруг магнита.

В следующем опыте (рис. 3.7) между полюсами неподвижного магнита свободно подвешена рамка L , которая выполнена из нескольких витков проволоки.

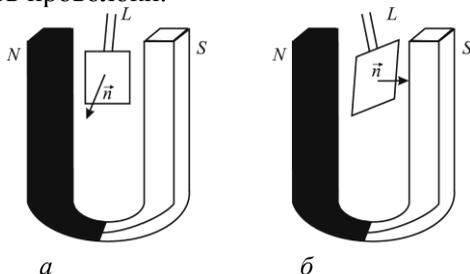


Рис. 3.7. Рамка с током поворачивается в магнитном поле подковообразного магнита

Если по рамке L проходит электрический ток, то она поворачивается перпендикулярно к линии, соединяющей полюсы магнита. Это явление используется в гальванометрах для измерения постоянного тока.

Можно также наблюдать взаимодействие постоянного магнита с катодными лучами, которые представляют собой поток электронов (рис. 3.8).

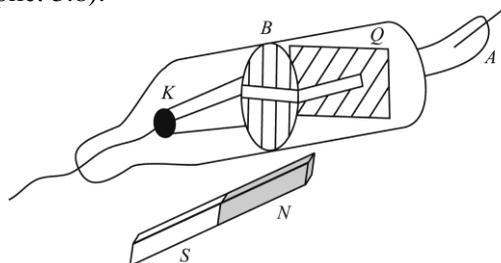


Рис. 3.8. Отклонение катодных лучей полем постоянного магнита

K — катод; A — анод; Q — люминесцирующий экран, который расположен под небольшим углом к оси трубки; B — экран со щелью, который вырезает пучок из общего потока катодных лучей.

Под действием постоянного магнита пучок катодных лучей отклоняется от первоначального прямолинейного направления.

Ампер установил чрезвычайно важное явление — взаимодействие двух проводников, по которым идёт ток (рис. 3.9). Если расположить параллельно два длинных гибких проводника и пропустить по ним ток, то проводники будут взаимодействовать друг с другом: если токи имеют противоположные направления, то проводники отталкиваются; при одинаковом направлении тока проводники притягиваются.

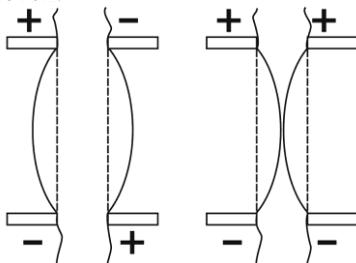


Рис. 3.9. Взаимодействие параллельных проводников с током

Из рассмотренных опытов можно сделать вывод: *магнитные действия магнитов тождественны магнитным действиям токов.*

В магнитном поле проявляются механические силы, которые действуют на другие магниты или проводники с током. Но это не единственное действие магнитного поля. Можно указать ещё и другие физические явления, в которых проявляется влияние магнитного поля. Например, под действием магнитного поля изменяется электрическое сопротивление различных металлов или размеры тел.

Слова и словосочетания

полосовой магнит
гальванометр

гибкий проводник
катодный луч

 *Это интересно!*

Джеймс Максвелл (1831 – 1879) — английский физик. Один из основателей кинетической теории газов, изучал их диффузию, теплопроводность и внутреннее трение. Самое главное научное достижение — создание теории электромагнитного поля. Считал свет одним из видов электромагнитного излучения, что блестяще подтвердилось, теоретически рассчитал давление света. Оставил свой след во многих областях физики, сконструировал ряд важных приборов.

Упражнение 3.2

1. Какое действие оказывает магнит на проводник с током?
2. Какое явление используют в гальванометрах для измерения постоянного тока?
3. Как взаимодействуют между собой проводники с током?
4. В каких физических явлениях проявляется влияние магнитного поля?

3.3. ИНДУКЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле характеризуют такие физические величины как индукция, напряжённость и магнитная проницаемость.

Индукция \vec{B} магнитного поля — это физическая величина, характеризующая магнитное поле в данном месте пространства и зависящая от тока, создающего поле, а также от свойств среды. Для

введения понятия магнитной индукции используют такой опытный факт. Помещают маленькую рамку с током в магнитное поле подковообразного магнита (см. рис. 3.7). Магнитное поле между полюсами магнита можно считать однородным, не изменяющимся, постоянным. Магнитное поле рамки с током взаимодействует с полем постоянного магнита, и рамка поворачивается относительно некоторой оси, то есть на рамку с током действует момент сил M . Вращающий момент зависит от положения рамки с током в поле, от площади рамки и силы тока в ней, но не зависит от формы рамки. Максимальное значение вращающего момента будет тогда, когда плоскость рамки расположится вдоль прямой, которая соединяет северный и южный полюсы подковообразного магнита. Т.е. когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению магнитного поля этого магнита (см. рис. 3.7, а). Если плоскость рамки перпендикулярна направлению магнитного поля, то вращающий момент равен нулю (см. рис. 3.7, б). В других положениях вращающий момент $0 < M < M_{\max}$. Если помещать одинаковую рамку с одинаковым током в разные магнитные поля, то максимальный момент сил окажется различным. Итак: $M_{\max} = BIS$, откуда индукция B равна:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS},$$

где I — сила тока в рамке, S — площадь плоскости рамки.

Единица магнитной индукции в СИ — тесла:

$$[B] = 1 \text{ Тл} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{А} \cdot \text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{м}^2} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Индукция магнитного поля \vec{B} — векторная величина. За направление вектора индукции магнитного поля принимают направление нормали \vec{n} к рамке или направление от южного полюса к северному полюсу магнитной стрелки (см. рис. 3.3).

 Это интересно!

Генрих Герц (1857 – 1894) — немецкий физик. Экспериментально доказал существование электромагнитных волн, предсказанных Максвеллом. Установил, что скорость их распространения

ния равна скорости света, считал возможным их передачу на расстоянии. Доработал теорию Максвелла об электромагнетизме. Наблюдал явление фотоэффекта. Его открытия обусловили появление в будущем радио, телевидения, радиолокации и многой, многой другой, безусловно полезной человечеству техники. Герц разрабатывал теорию резонаторного контура, изучал свойства катодных лучей, исследовал влияние ультрафиолетовых лучей на электрический разряд. В ряде работ по механике дал теорию удара упругих шаров, рассчитал время соударения и т.д. В книге «Принципы механики» (1894) дал вывод общих теорем механики и её математического аппарата, исходя из единого принципа (принцип Герца). Именем Герца с 1933 года называется единица измерения частоты Герц, которая входит в международную метрическую систему единиц СИ.

Упражнение 3.3

1. Какие физические величины характеризуют магнитное поле?
2. Что называется индукцией магнитного поля?
3. Какая единица магнитной индукции в СИ?
4. Как направлен вектор индукции магнитного поля?
5. В прямолинейном проводе, расположенном в воздухе, сила тока равна 10 А. Определить индукцию магнитного поля этого тока на расстоянии 20 см от проводника. (Ответ: 10^{-5} Тл).

3.4. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Магнитные поля изображают графически с помощью силовых линий магнитной индукции. Направление этих линий указывает на направление сил, действующих в этом поле. Вид силовых линий (спектр магнитного поля) можно получить с помощью железных опилок или маленьких магнитных стрелок (рис. 3.10).

Из опытов следует, что железные опилки в магнитном поле тока устанавливаются вдоль определенных замкнутых линий. Линии, вдоль которых располагаются в магнитном поле оси маленьких магнитных стрелок или железные опилки, называются магнитными линиями или силовыми линиями магнитной индукции.

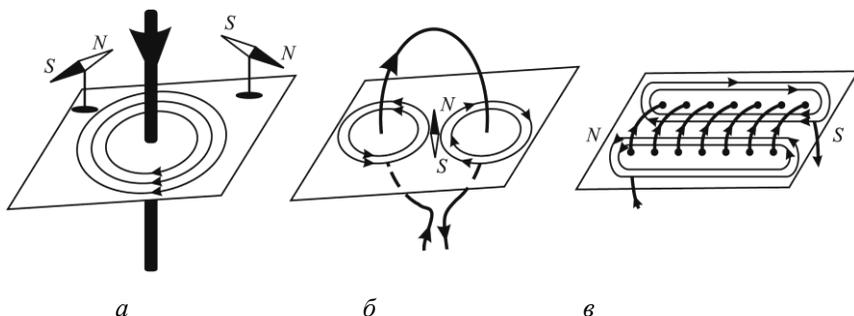


Рис. 3.10. Спектры магнитных полей: а — прямого; б — кругового; в — соленоида

Правила изображения силовых линий:

- магнитные силовые линии проводят так, что касательные к ним в любой точке совпадают с вектором магнитной индукции;
- силовые линии нигде не пересекаются;
- силовые линии всегда замкнуты;
- чем сильнее магнитное поле, тем больше силовых линий.

Направление силовых линий магнитной индукции определяют по правилу винта. Если направление прямого тока (рис. 3.11, а) совместить с поступательным движением конца винта, то направление вращения ручки винта укажет направление магнитных линий.

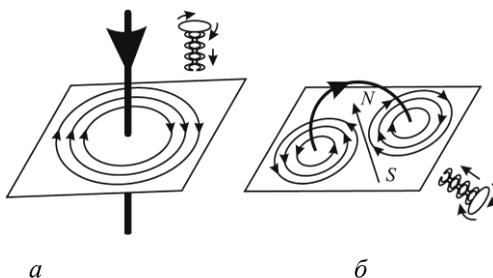


Рис. 3.11. Правило винта: а — для прямого тока; б — для кругового тока

Если ток течёт по круговому проводнику или соленоиду, то вращение ручки винта совпадает с направлением тока, а конец винта указывает направление магнитных линий (рис. 3.11, б). Круго-

вой ток создает магнитное поле с двумя полюсами северным и южным. Это аналогично прямому магниту.

Различают однородное и неоднородное магнитные поля. Если величина и направление магнитной индукции \vec{B} во всех точках поля одинаковы, то такое поле называется *однородным* (например, между полюсами подковообразного магнита или внутри соленоида).

Если индукция магнитного поля не одинакова по величине или по направлению во всех точках поля, то поле называется *неоднородным* (например, магнитное поле прямого тока, полосового магнита). Графическое изображение однородного и неоднородного магнитных полей показано на рис. 3.12.

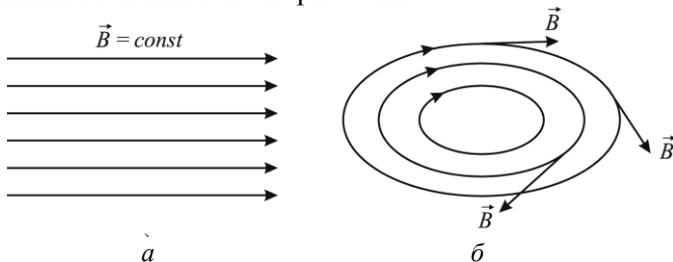


Рис. 3.12. Линии индукции магнитного поля:
 a — однородного; b — неоднородного

Если необходимо показать, что магнитное поле направлено от нас за плоскость листа или к нам, то условно это изображают как на рис. 3.13.

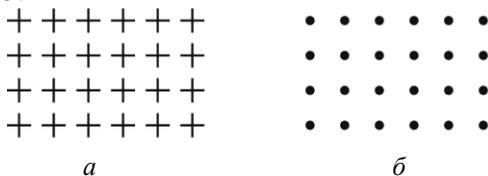


Рис. 3.13. Линии индукции магнитных полей направлены:
 a — к нам; b — от нас

Можно также указать полюсы магнитного поля.

Существует некоторая схожесть магнитного поля прямого магнита и магнитного поля соленоида. И у того и у другого существуют два полюса — северный N и южный S . Силовые линии индукции магнитного поля выходят из северного полюса и входят в

южный полюс. Внутри соленоида силовые линии параллельны между собой, индукция B постоянна по величине и по направлению (однородное поле).

Сравним свойства магнитного поля и электростатического. Линии напряжённости электростатического поля начинаются на положительных зарядах, кончаются на отрицательных зарядах и не являются замкнутыми. Замкнутость магнитных силовых линий представляет собой фундаментальное свойство только магнитного поля. В отличие от электростатического поля, магнитное поле не является потенциальным. Магнитное поле — вихревое поле, оно не имеет источников и не имеет магнитных зарядов. Характеристики магнитного поля, как и электростатического, зависят от свойств окружающей среды.

3.5. НАПРЯЖЁННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ СРЕДЫ

Для характеристики магнитного поля вне зависимости от свойств среды вводят понятие напряжённости магнитного поля H .

Напряженность магнитного поля можно определить с помощью силы, которая действует на помещенный в поле пробный магнит. Магнитные полюсы не существуют по отдельности, поэтому на северный и южный полюсы пробного магнита действуют противоположно направленные силы. Возникает момент пары сил. Этот момент характеризует величину напряженности поля в данном месте. Например, в магнитном поле цилиндрической катушки (соленоида) магнитный момент прямо пропорционален числу витков N и силе тока I и обратно пропорционален длине l катушки:

$$H = \frac{I \cdot N}{l}$$

Единица напряжённости в СИ — ампер на метр: $[H] = \frac{\text{А}}{\text{м}}$.

Направление вектора напряжённости магнитного поля в каждой точке совпадает с направлением силовых линий (и с направлением вектора индукции \vec{B} магнитного поля). Внутри соленоида он направлен от южного полюса S к северному полюсу N . Вне катушки — от северного полюса к южному.

Если в магнитное поле поместить вещество, то магнитная индукция \vec{B} изменяется (при неизменной напряжённости магнитного поля). Под действием магнитного поля магнитные диполи вещества ориентируются в направлении поля и увеличивают магнитную индукцию от \vec{B}_0 (в вакууме) до \vec{B} (в среде).

Формула связи напряжённости магнитного поля с индукцией в вакууме:

$$B_0 = \mu_0 H .$$

Здесь μ_0 — магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{м}}$.

Если в магнитное поле поместить какое-нибудь вещество, то $B = \mu \mu_0 H$, где μ — магнитная проницаемость среды.

Магнитная проницаемость среды показывает во сколько раз индукция магнитного поля в данной среде больше, чем в вакууме:

$$\mu = \frac{B}{B_0} .$$

Магнитная постоянная физического смысла не имеет. Но произведение $\mu_0 \epsilon_0 = \frac{1}{c^2}$, где c — скорость света в вакууме, ϵ_0 — электрическая постоянная. Это соотношение свидетельствует о наличии связи между светом и электромагнитными явлениями. Впервые на это обратил внимание английский физик Д. Максвелл. Вещества, которые ослабляют внешнее магнитное поле, называют *диамагнетиками* (стекло, серебро, медь, висмут). Для них $\mu < 1$.

В природе существуют вещества, которые значительно усиливают внешнее магнитное поле, например железо, кобальт, никель. Это *ферромагнетики* ($\mu > 1$). Вещества, которые лишь незначительно усиливают магнитное поле (платина, алюминий, воздух), называются *парамагнетиками* ($\mu > 1$). Числовое значение определяется опытным путем. Парамагнитные тела притягиваются к магниту, диамагнитные — отталкиваются.

Слова и словосочетания

соленоид	силовые линии
напряжённость	катушка
диполь	магнитная проницаемость

Упражнение 3.4

1. Ток силой 20 А, протекая по кольцу из медной проволоки сечением $1,0 \text{ мм}^2$, создаёт в центре кольца напряжённость магнитного поля 178 А/м . Какая разность потенциалов приложена к концам проволоки, образующей кольцо? (Ответ: 0,12 В).

2. Два круговых витка радиусом $R = 4 \text{ см}$ каждый расположены в параллельных плоскостях на расстоянии $d = 10 \text{ см}$ друг от друга. По виткам текут равные токи 2 А. Найти напряжённость магнитного поля на оси витков в точке, находящейся на равном расстоянии от них. Задачу решить, когда: а) токи в витках текут в одном направлении; б) токи текут в противоположных направлениях. (Ответ: а — $12,2 \text{ А/м}$; б — 0).

3.6. ЗАКОН БИО–САВАРА–ЛАПЛАСА

Индукция магнитного поля тока различна для разных проводников, создающих это поле. Поэтому для определения магнитной индукции тока в каждом конкретном случае используют закон Био–Савара–Лапласа. Французский математик П. Лаплас обобщил результаты экспериментов французских физиков Ж. Био и Ф. Савара. В результате он получил закон: если по проводнику течёт постоянный ток силой I , то небольшой его отрезок длиной Δl в точке А на расстоянии r (рис. 3.14) создаёт магнитную индукцию \vec{B} , численное значение которой равно

$$\Delta B = \frac{\mu I \Delta l \sin \beta}{r^2}, \quad (3.1)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость среды; β — угол между направлением тока в отрезке Δl и прямой r , которая соединяет этот отрезок с точкой А.

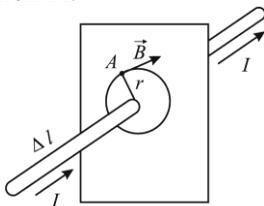


Рис. 3.14. Индукция магнитного поля в точке А создана электрическим током I в проводнике Δl

Расчёты по формуле (3.1) дают следующее выражение для величины индукции магнитного поля бесконечного прямолинейного проводника с током в однородной среде с относительной магнитной проницаемостью μ :

$$B_{\text{пр}} = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r},$$

где r — расстояние от проводника до точки, в которой вычисляют магнитную индукцию (см. рис. 3.14).

Если $l > r$, то проводник можно считать бесконечным.

Индукция магнитного поля в центре кругового тока:

$$B_{\text{пр}} = \mu\mu_0 \frac{I}{2R},$$

где R — радиус витка.

Внутри соленоида:

$$B_{\text{сол}} = \mu\mu_0 In,$$

где $n = \frac{N}{l}$ — число витков N проводника, отнесённое к длине соленоида l .

 *Это интересно!*

Жан Батист Био (1774-1862) — французский физик, геодезист и астроном, иностранный почётный член Петербургской АН (1819). Основные труды по изучению поляризации света (закон, названный его именем), магнитного поля электрического тока (т. н. закон Био-Савара, 1820), акустики.

В 1811 Био открыл поляризацию при преломлении (независимо от Э.Малюса), в 1815 — круговую поляризацию (независимо от Д.Араго и Д.Брюстера), в том же году установил закон вращения плоскости поляризации (закон Био) и открыл существование право- и левовращающих веществ. Обнаружил оптическую активность у некоторых органических соединений, в частности у раствора сахара. Показал, что угол поворота плоскости поляризации пропорционален концентрации раствора, заложив тем самым основу недеструктивного метода определения концентрации сахара — сахарометрии. За эту работу Био был награжден в 1840 медалью Румфор-

да. В 1820 совместно с Ф.Саваром открыл закон, определяющий напряженность магнитного поля проводника с током (закон Био – Савара). Био занимался также историей науки, в частности изучением трудов Ньютона. Автор авторитетного учебника по общей физике — *Курса общей физики* (1816).

Феликс Савар (1791—1841) — французский физик. Был сперва врачом в Страсбурге, затем преподавателем физики в одном частном учебном заведении в Париже и, наконец, консерватором физического кабинета в Коллеж де Франс. Знаменит своими научными исследованиями, главным образом, в области акустики. Во всех учебниках физики упоминается о зубчатом колесе Савара, служащем для определения числа колебаний звучащего тела, а также о простом приспособлении, придуманном Саваром для нахождения положений узлов и пучностей в звучащих трубках. Его опыты направлены были преимущественно к изучению условий резонанса и передачи звуковых колебаний в различных телах. Он занимался вопросом о пределах слышимости тонов. Принимал Савар участие и в опытах Био над изучением взаимодействия между электрическим током и магнитным полем; результатом этих опытов было установление известного «закона Био и Савара».

Упражнение 3.5

1. Какой закон используют для определения магнитной индукции тока?
2. Сформулировать закон Био–Савара–Лапласа.
3. Два круговых витка расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях так, что центры этих витков совпадают. Радиус каждого витка $R = 2$ см, токи в витках по 5 А. Найти напряжённость магнитного поля в центре этих витков. (Ответ: 177 А/м0).
4. В центре кругового проволочного витка создаётся магнитное поле напряжённости H при разности потенциалов U_1 на концах витка. Какую надо приложить разность потенциалов U_2 , чтобы получить такую же напряжённость магнитного поля в центре витка вдвое большего радиуса, сделанного из той же проволоки? (Ответ: $U_2 = 4 U_1$).
5. Катушка длиной 30 см имеет 1000 витков. Найти напряжённость магнитного поля внутри катушки, если по ней проходит

ток 2 А. Диаметр катушки считать малым по сравнению с её длиной. (Ответ: 6,67 кА/м).

6. Определить направление тока по направлению вектора магнитной индукции в центре кругового проводника с током, если вектор \vec{B} направлен вверх, относительно плоскости витка стоком. (Ответ: против часовой стрелки).

7. Определить индукцию однородного магнитного поля, в котором на прямой провод длиной 10 см, расположенный под углом 30° к линиям индукции, действует сила 0,2 Н, если по проводнику проходит ток 8 А. (Ответ: 0,5 Тл).

3.7. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Для изучения магнитного поля вводят ещё одну физическую величину — *поток магнитной индукции* (или магнитный поток). Предположим, что в магнитном поле с индукцией \vec{B} находится некоторая площадка S (рис. 3.15). Это может быть площадь, ограниченная некоторым проводником. Такой замкнутый проводник называется *контуром*.

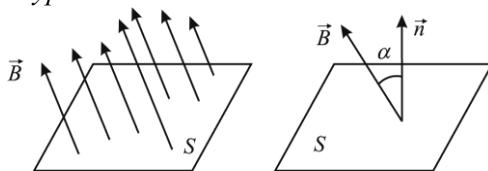


Рис. 3.15. Магнитный поток через контур S

Магнитным потоком Φ называется физическая величина, равная произведению магнитной индукции \vec{B} на площадь контура S и косинус угла между \vec{B} и \vec{n} (\vec{n} — нормаль к площади S).

$$\Phi = B \cdot S \cos \alpha .$$

Магнитный поток наглядно можно представить как величину, пропорциональную числу линий магнитной индукции, пересекающих контур S . Единица магнитного потока в СИ — вебер: $[\Phi] = 1 \text{ Вб}$.

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ В} \cdot \text{с} .$$

Один вебер — это магнитный поток, который создаётся однородным магнитным полем с индукцией 1 Тл через перпендикулярную к силовым линиям магнитного поля поверхность площадью 1 м².

Из определения магнитного потока следует, что он зависит от положения площадки S в магнитном поле. Рассмотрим несколько положений площадки в магнитном поле (рис. 3.16).

Определим магнитный поток для разных случаев:

1. $\Phi = -BS$ ($\alpha = 180^\circ$);
2. $\Phi = BS$ ($\alpha = 0$);
3. $\Phi = BS \cos \alpha$;
4. $\Phi = \Phi = 0$ ($\alpha = 90^\circ$).

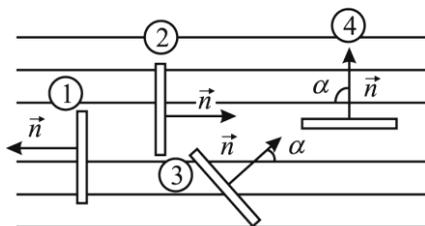


Рис. 3.16. Зависимость магнитного потока от положения площадки S в магнитном поле

Понятие изменения магнитного потока используют для выражения работы, производимой при перемещении проводника с током в магнитном поле.

Рассмотрим отрезок l проводника, по которому течёт ток I . Пусть этот отрезок проводника перемещается в плоскости, перпендикулярной к силовым линиям магнитного поля на расстояние $\Delta \vec{r}$. Подсчитаем работу A , производимую при этом:

$$A = (\vec{F}, \Delta \vec{r}) = |\vec{F}| |\Delta \vec{r}| = I l B \Delta r = I B \Delta S,$$

где ΔS — площадь поверхности, описываемой рассматриваемым отрезком проводника при его перемещении на $\Delta \vec{r}$.

$$B \Delta S = \Delta \Phi,$$

где $\Delta \Phi$ — изменение магнитного потока через поверхность ΔS .

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока в проводнике на изменение магнитного потока через поверхность, описываемую проводником при его движении.

Эта формула справедлива при любой ориентации проводника относительно магнитного поля и при любой форме проводника.

Слова и словосочетания

магнитный поток	замкнутый проводник
контур	отрезок проводника

Упражнение 3.6

1. Что называется магнитным потоком?
2. Назвать единицу магнитного потока в СИ.
3. От чего зависит магнитный поток?
4. Чему равна работа по перемещению проводника с током в магнитном поле?

3.8. ПРОИСХОЖДЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Когда изучение магнитных явлений только начиналось, учёные обратили внимание на факт существования полюсов в намагниченном бруске. Причём на полюсах магнитные свойства выражены особенно сильно. Действие каждого магнитного полюса очень быстро убывает по мере увеличения расстояния от него. С помощью крутильных весов, аналогичных тем, что использовались в электростатике, Кулон исследовал взаимодействие двух длинных и тонких магнитов. В результате он установил закон Кулона: *два одноимённых полюса отталкиваются друг от друга, а два разноимённых полюса притягиваются друг к другу с силой, которая прямо пропорциональна «количеству магнетизма», сосредоточенному в этих полюсах, и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.*

Закон взаимодействия полюсов магнитов аналогичен закону взаимодействия электростатических зарядов. Кулон, однако, установил и глубокое различие между электрическими и магнитными явлениями. Это различие заключается в следующем: 1) электрические заряды можно разделить и получить тело с избытком положительного или отрицательного электричества; 2) намагниченное тело никак нельзя разделить на тело только с северным или только с южным магнетизмом, т.е. нельзя получить тело с одним только полюсом. Более того, оба полюса любого магнита представляют собой равные по величине количества магнетизма.

Для выяснения различия между электрическими и магнитными явлениями проведём такой опыт (рис. 3.17).

Поднесём к заряженному телу Q кусок металла P . На его ближайшем конце возникает отрицательный заряд, а на противоположном — положительный. Точно также, когда подносим стальной брусок B к северному полюсу магнита A , то на ближайшем конце бруска возникает южный, а на более удалённом — северный магнитный полюс. Пока аналогия полная. Но дальше явления идут совершенно различно. Наэлектризованное тело P можно разделить на две части и, раздвинув, получить два противоположно заряженных тела.

Если разделить намагнитившийся стальной брусок, то окажется, что каждая его часть будет иметь два полюса (см. рис. 3.17).

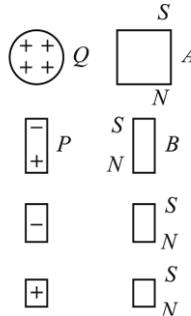


Рис. 3.17. Электризация тела P методом индукции и намагничивание куска железа B под влиянием магнита A

Разделить полюсы, т.е. получить тело с одним только полюсом, невозможно никаким методом. Таким путём Кулон пришёл к гипотезе о существовании элементарных магнитов с неразрывно связанными полюсами. Каждая небольшая частица вещества — его атом, молекула или небольшая группа атомов, или молекул представляют собой маленький магнит с двумя полюсами на концах.

С точки зрения этой гипотезы процесс намагничивания железа происходит следующим образом (рис. 3.18).

При хаотическом расположении элементарных магнитов их действие уравнивается и брусок в целом не намагничен. В магнитном поле часть элементарных магнитов повернутся и выстроятся цепочками. При этом действие противоположных полю-

сов внутри магнита взаимно уничтожается, а на концах бруска возникают магнитные полюсы, таким образом, намагничивание тела представляет собой упорядочение расположения его элементарных магнитов под влиянием внешнего магнитного поля. Это аналогично процессу поляризации диэлектриков.

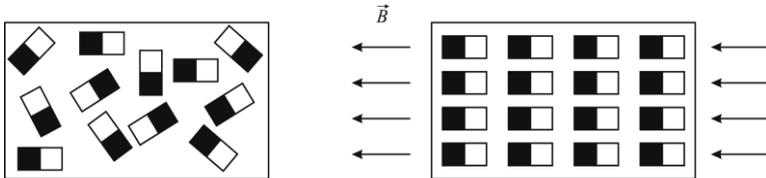


Рис. 3.18. Процесс намагничивания с точки зрения элементарных магнитов: *a* — хаотическое распределение магнитов; *б* — упорядоченное распределение в магнитном поле \vec{B}

Открытие Эрстеда и Ампера привели к новому и более глубокому представлению о природе магнитных явлений: элементарный магнит — это круговой ток, циркулирующий внутри небольшой частицы вещества (атома, молекулы) или группы их. При намагничивании большая или меньшая часть таких токов устанавливается параллельно друг другу — «амперовы токи».

По своим магнитным свойствам круговой ток вполне подобен короткому магниту, ось которого перпендикулярна к плоскости тока. Поэтому система «амперовых токов» (рис. 3.19) совершенно равносильна цепочкам элементарных магнитиков в гипотезе Кулона.

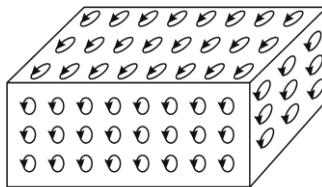


Рис. 3.19. «Амперовы токи» в намагниченном железе

С точки зрения теории Ампера становится понятной неотделимость друг от друга северных и южных полюсов. Каждый элементарный магнит представляет собой круговой виток тока. Мы видели раньше, что одна сторона этого витка соответствует север-

ному, а другая — южному полюсу. Именно поэтому нельзя отделить друг от друга северный и южный полюсы, как нельзя отделить одну сторону плоскости от другой.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- каждый атом вещества можно рассматривать как круговой ток. Созданная уже в XX веке теория атома подтверждает факт вращения отрицательно заряженных электронов вокруг ядра. Магнитное поле намагниченного тела складывается из магнитных полей круговых токов;

- процесс намагничивания тела заключается в том, что под влиянием внешнего магнитного поля его элементарные токи в большей или меньшей степени устанавливаются параллельно друг другу и создают результирующее магнитное поле.

3.9. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ. ЗАКОН АМПЕРА

В основе всех магнитных взаимодействий лежит воздействие магнитного поля на токи. Огромное количество технических применений электромагнитных явлений сводится к воздействию магнитного поля на проводники, по которым идёт ток. С помощью опыта выясним, как магнитное поле действует на прямолинейный проводник с током (рис. 3.20).

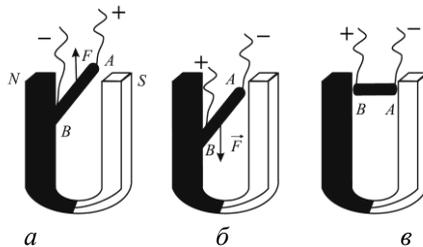


Рис. 3.20. Действие силы \vec{F} в магнитном поле на проводник с током: *а* — проводник выталкивается; *б* — проводник втягивается; *в* — магнитное поле при таком положении проводника не действует

На основании опытов можно сделать вывод: направление силы \vec{F} , с которой магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током I , всегда перпендикулярно к направлению тока и к направлению вектора магнитной индукции. На про-

водники, расположенные вдоль направления поля, поле не действует. Сила \vec{F} называется *силой Лоренца* или *силой Ампера*. При этом взаимное расположение направлений I , \vec{B} и \vec{F} такое, как показано на рис. 3.21.

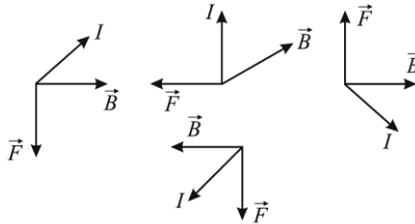


Рис. 3.21. Различные случаи расположения магнитной индукции, силы тока и силы, с которой поле действует на проводник с током

Для запоминания этого взаимного расположения удобно пользоваться правилом левой руки (рис. 3.22): если расположить левую руку так, чтобы линии индукции входили в ладонь, а вытянутые пальцы были направлены вдоль тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Лоренца или Ампера.

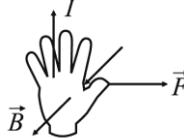


Рис. 3.22. Правило левой руки

Величину силы \vec{F} , с которой поле действует на проводник, можно измерить с помощью чувствительных весов.

Оказывается, что эта сила пропорциональна току индукции магнитного поля, длине l участка проводника и углу φ между векторами магнитной индукции \vec{B} и тока I .

Это закон Ампера: *на проводник с током, помещённый в однородное магнитное поле, действует сила, стремящаяся переместить его за пределы поля, и равная произведению индукции тока, длины проводника и синуса угла между проводником и индукцией.*

$$F = IBl \sin \varphi.$$

Из этой формулы следует, что при $\varphi = 0$, т.е. когда проводник длиной l параллелен вектору индукции \vec{B} , сила будет равна нулю. На проводник в этом случае сила не действует. Это подтверждается и на опыте.

Упражнение 3.7

1. Как направлена сила, с которой магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током?

2. Сформулировать правило левой руки.

3. Сформулировать закон Ампера.

4. Под действием силы Лоренца положительный ион движется в однородном магнитном поле. Чему равна работа силы Лоренца, действующей на ион? (Ответ: 0).

5. Как действует электрическое (магнитное) поле на неподвижную (подвижную) электрически заряженную частицу?

3.10. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОВОДНИКОВ С ТОКОМ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕДИНИЦЫ СИЛЫ ТОКА

В подразделе 3.2 мы говорили о том, что два проводника с током взаимодействуют между собой. Это нетрудно объяснить, если учесть, что каждый проводник находится в магнитном поле, которое создаётся током второго проводника. Направление индукции магнитного поля каждого проводника с током определяем по правилу винта, а силу, которая будет действовать на каждый проводник, определим по правилу левой руки (см. рис. 3.22).

Индукция магнитного поля первого проводника (рис. 3.23) на расстоянии r от него равна:

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi r}.$$

По закону Ампера на любой отрезок длиной l второго проводника с током I_2 будет действовать сила \vec{F} :

$$F = B_1 \cdot I_2 l = \mu\mu_0 \frac{I_1 \cdot I_2}{2\pi r} l, \quad (\sin 90^\circ = 1).$$

Легко показать, что такая же сила действует на первый проводник в магнитном поле тока I_2 .

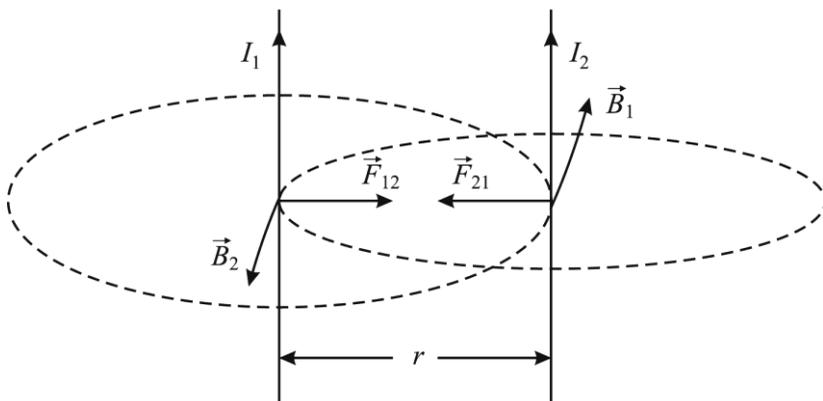


Рис. 3.23. Взаимодействие двух параллельных проводников с током

Для установления единицы силы тока можно воспользоваться любым из различных действий электрического тока — тепловым, химическим или магнитным. В системе СИ ампер (одна из основных единиц в этой системе) определяется при помощи сил взаимодействия между проводниками, по которым текут токи. Для определения ампера используется формула

$$F = \mu\mu_0 \frac{I_1 \cdot I_2 l}{2\pi r}$$

Один ампер — это сила такого постоянного тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам, расположенным на расстоянии $r = 1$ м друг от друга, вызывает между ними силу взаимодействия $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины провода ($l = 1$ м).

Провода предполагаются при этом очень длинными и очень тонкими.

Однако, практически трудно с достаточной точностью измерить силу \vec{F} . Поэтому на практике для установления эталона ампера и для калибровки других приборов, которые используют для измерения силы тока, пользуются прибором — так называемыми ампер-весами. В них при помощи точных весов измеряется сила взаимодействия двух катушек, по которым проходит один и тот же ток.

Упражнение 3.8.

1. Одинаковые или различные явления наблюдаются в сплошных массивных проводниках и диэлектриках, помещённых в переменное магнитное поле?

2. Проводник, активная длина которого 0,4 м, движется со скоростью 10 м/с под углом 30° к линии индукции однородного магнитного поля. Определить индукцию магнитного поля, если на концах проводника возникла ЭДС, равная 2 В. (Ответ: 1 Тл).

3. Всегда ли в проводящем контуре при изменении магнитного потока возникают ЭДС индукции и индукционный ток?

4. При каком условии можно получить постоянное вихревое поле? (Ответ: при равномерном изменении индукции магнитного поля).

5. Проводник сопротивлением 2 Ом пронизывается магнитным потоком. Определить изменение магнитного потока, если за 0,4 с в проводнике возник индукционный ток 0,5 А? (Ответ: 0,4 Вб).

3.11. СИЛА ЛОРЕНЦА

Магнитное поле тока следует рассматривать как поле, создаваемое движущимися зарядами. Эта важная мысль была высказана Лоренцом и подтверждена опытами Эйхенвальда, Рентгена и др. Лоренцу принадлежит и обратное утверждение: силы, с которыми магнитное поле действует на проводник с током, являются силами, действующими на движущиеся заряды (электроны или ионы), которые и составляют ток. Эти силы называют *силами Лоренца*. Но заряды, которые движутся в проводнике, сталкиваются с атомами вещества в данном проводнике. Поэтому магнитные силы, действующие на движущиеся заряды, увлекают и сам проводник, в котором эти заряды движутся. Таким образом, силы взаимодействия между током и полем сводятся к силам Лоренца. Величину силы Лоренца можно определить по формуле

$$F = qvB \sin \alpha,$$

где q — элементарный заряд (электрон, протон, ион); \vec{v} — средняя скорость движения свободных зарядов; \vec{B} — индукция магнитного поля; α — угол между вектором индукции \vec{B} и вектором скорости \vec{v} заряда.

Направление силы Лоренца можно определить по правилу левой руки (как и силу Ампера): левую руку надо расположить так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца показывали направление скорости положительного заряда. Тогда отогнутый большой палец покажет направление силы, с которой магнитное поле действует на положительный заряд.

На отрицательный заряд, движущийся в том же поле и в том же направлении, действует противоположно направленная сила. Сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно скорости \vec{v} , с которой заряженная частица влетает в магнитное поле. Это значит, что сила Лоренца сообщает заряженной частице массы m центростремительное ускорение. Частица при этом будет двигаться по окружности радиуса R (рис. 3.24).

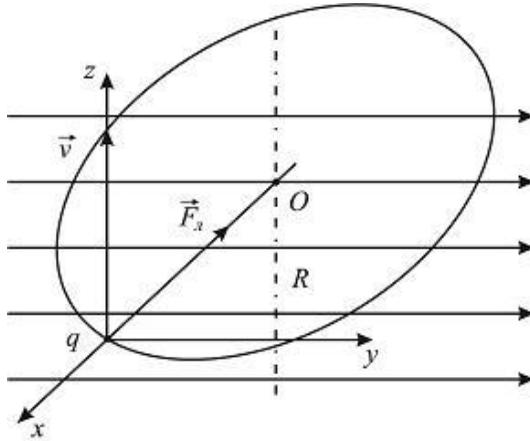


Рис. 3.24. Движение элементарной частицы q по окружности в магнитном поле

$$F_{\text{л}} = qvB \quad \text{или} \quad F_{\text{л}} = ma_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R}.$$

Из этих уравнений найдём радиус окружности R , по которой движется заряд.

$$R = \frac{mv}{Bq},$$

где m — масса частицы, m/q — удельный заряд частицы, v — средняя скорость частицы, B — индукция магнитного поля.

Выражение силы Лоренца можно вывести, используя закон Ампера. По закону Ампера $F_A = IBl \sin \alpha$.

Если по проводнику с сечением S (рис. 3.25) проходит заряд q со средней скоростью \vec{v} , то будем иметь:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{nSvte}{t} = n \cdot S \cdot v \cdot e, \quad (q = N \cdot e = nV \cdot e = nSvt \cdot e).$$

Здесь n — число свободных зарядов в единице объёма проводника, e — заряд электрона, N — число свободных электронов в объёме V .

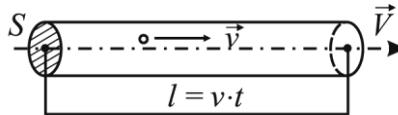


Рис. 3.25. Проводник с поперечным сечением S , через которое за время t пройдёт заряд q . l — длина пути зарядов, которые находятся в объёме V

В общем случае элементарный заряд обозначаем через q , тогда сила тока $I = nSvq$.

Подставим это выражение в закон Ампера:

$$F_A = IBl \sin \alpha = nSvqBl \sin \alpha = BqNv \sin \alpha.$$

Здесь $nSl = nV = N$.

Сила Ампера действует на все N зарядов в данном проводнике. На один заряд действует сила Лоренца:

$$F_{A_i} = \frac{F_A}{N} = Bqv \sin \alpha.$$

☝ *Это интересно!*

Хендрик Лоренц (1853—1928) — голландский физик-теоретик. Создал классическую электронную теорию как теорию различных свойств вещества и электромагнитных явлений. Ввёл силу, действующую на движущуюся заряженную частицу в электрическом и магнитном полях. Своими расчётами подготовил переход к идеям теории относительности и квантовой механики.

Упражнение 3.9

1. По какой формуле можно определить силу Лоренца?
2. По какому правилу можно определить направление силы Лоренца?
3. Электрон влетает в однородное магнитное поле, индукция которого $0,5$ Тл, со скоростью $2 \cdot 10^4$ м/с перпендикулярно линиям индукции. Определить силу, с которой магнитное поле действует на электрон. (Ответ: $1,6 \cdot 10^{-2}$ Н).
4. Протон и электрон, ускоренные одинаковой разностью потенциалов, влетают в однородное магнитное поле. Во сколько раз радиус кривизны R_p траектории протона больше радиуса кривизны R_e траектории электрона? (Ответ: в 1836 раз).
5. Протон и α -частица влетают в однородное магнитное поле, направление которого перпендикулярно к направлению их движения. Во сколько раз период обращения T_p протона в магнитном поле больше периода обращения T_α α -частицы? (Ответ: в 2 раза).
6. Какое ускорение сообщает заряженной частице сила Лоренца?

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

4.1. ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ. ЗАКОН ФАРАДЕЯ. ПРАВИЛО ЛЕНЦА.

Электрический ток действует на магнитную стрелку, намагничивает железо. Английский ученый М. Фарадей и другие учёные искали ответ на вопрос: «Если ток создает магнитное поле, нельзя ли с помощью магнитного поля создать электрический ток?» Рассмотрим некоторые опыты Фарадея.

Опыт 1. Будем вводить в катушку с гальванометром постоянный магнит (рис. 4.1). При этом в катушке возникает электрический ток, и стрелка гальванометра отклоняется в одну или в другую сторону – в зависимости от направления движения магнита. Если магнит ввести в катушку и оставить там, электрического тока в катушке не возникает.

Опыт 2. Вместо полосового магнита возьмём электромагнит B и будем вводить его в катушку A (рис. 4.2). Гальванометр G покажет наличие тока в катушке A при относительном движении катушек.

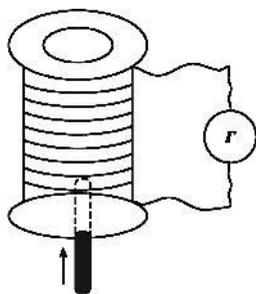


Рис. 4.1

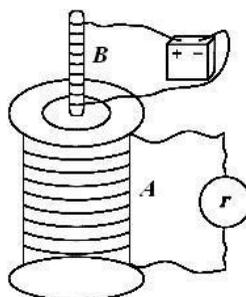


Рис. 4.2

Опыт с электромагнитом можно видоизменить. Если электромагнит (катушку B) оставить неподвижной, а только замыкать цепь, то гальванометр также покажет, что в катушке A возникает ток (рис. 4.3). Затем ток в катушке A исчезает, а при размыкании цепи он снова возникает.

Сделаем вывод: в рассмотренных опытах электрический ток возникал в проводнике при пересечении им магнитного поля. При этом не имеет значения, движется ли проводник в магнитном поле или изменяется магнитное поле.

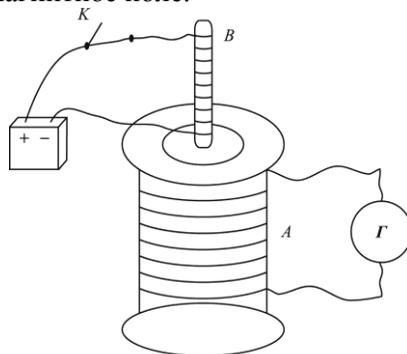


Рис. 4.3

Возникающий в замкнутом проводнике электрический ток называется индукционным (I_i), а вызывающая его электродвижущая сила — ЭДС индукции (E_i).

Опыты Фарадея показали, что ЭДС индукции и индукционный ток в замкнутом контуре возникают лишь при изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводник (контур). Чем больше скорость изменения магнитного потока, тем большая ЭДС индукции и больший индукционный ток возникают в контуре. Если магнитный поток не изменяется, то индукционный ток не возникает.

Таким образом, Фарадеем был открыт основной закон электромагнитной индукции, который математически записывается так:

$$E_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Здесь $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ — скорость изменения магнитного потока.

Следовательно, при изменении магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводник (контур), в нём возникает индукционный электрический ток, существующий в течении всего времени изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром

ЭДС индукции создаёт в замкнутом проводнике индукционный ток. Этот индукционный ток создаёт собственное магнитное поле, а, значит, и свой магнитный поток. Согласно экспериментальным данным, которые были получены русским учёным Э. Ленцем в 1834 г, магнитный поток от индукционного тока и внешний магнитный поток противоположны по направлению. Это в законе Фарадея учтено в виде знака «минус».

$$E_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{при} \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0 \quad E_i < 0, \quad \text{при} \quad \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0 \quad E_i > 0.$$

Правило Ленца можно сформулировать так: ***индукционный ток имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающего этот ток.***

Возникновение в замкнутом проводнике электрического тока, обусловленное изменением магнитного потока, пронизывающего контур этого проводника, называется ***явлением электромагнитной индукции.***

Изменение магнитного потока может быть вызвано как механическим движением магнита, так и изменением вектора магнитной индукции при пропускании переменного тока в катушке. Первое из этих условий реализуется в индукционных генераторах электрического тока, в которых вращающийся электромагнит возбуждает ток в обмотках неподвижного статора. Второе условие реализуется в трансформаторах, где изменение силы тока в первичной обмотке вызывает изменение магнитного потока и, следовательно, появление индукционного тока во вторичной обмотке, которую пронизывает этот изменяющийся поток.

Слова и словосочетания

намагничивать	гальванометр
электромагнит	замкнутый
индукционный ток	противодействовать

Упражнение 4.1

1. Что называется электромагнитной индукцией?
2. Сформулировать правило Ленца.
3. Возникнет ли индукционный ток в незамкнутом (замкнутом) проводящем контуре, пересекаемом переменным магнитным полем?
4. Принцип действия генераторов электрического тока

4.2. ВИХРЕВОЕ ПОЛЕ. ИНДУКЦИОННЫЙ ТОК

Пусть проводник АВ (рис. 4.4), помещённый в магнитное поле с индукцией \vec{B} , движется поступательно со скоростью \vec{v} в направлении, перпендикулярном магнитному полю.

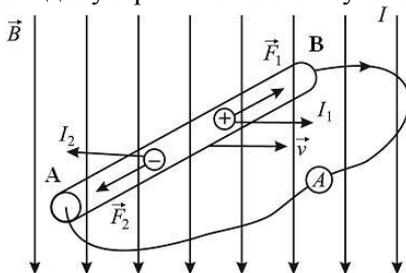


Рис. 4.4. Возникновение ЭДС индукции в движущемся проводнике

Вместе с проводником совершают поступательное движение свободные электроны проводника и положительные ионы кристаллических решеток проводника.

На отдельные заряды в движущемся проводнике действует сила Лоренца: \vec{F}_1 — на положительные ионы, \vec{F}_2 — на электроны. Положительные ионы связаны с кристаллической решёткой и не могут перемещаться. Электроны перемещаются к концу А проводника и скапливаются там. Таким образом на конце А возникает избыток электронов, на конце В — избыток положительных зарядов. Создаётся разность потенциалов между концами А и В, которую мы называем ЭДС индукции.

Таким образом, если проводник движется в постоянном во времени магнитном поле, в нём возникает ЭДС индукции. Работа по перемещению единичного положительного заряда вдоль проводника АВ на расстояние l переходит в энергию электрического поля проводника, т.е. и здесь выполняется закон сохранения и превращения энергии. ЭДС индукции возникает и тогда, когда неподвижный проводник находится в переменном магнитном поле.

Но электрическое поле, которое возникает при изменении магнитного поля, имеет совсем другую природу, чем электростатическое поле, созданное электрическими зарядами. Это так называемое *вихревое электрическое поле*. Линии напряжённости такого поля замкнуты, подобно линиям индукции магнитного поля. Работа вихревого электрического поля на замкнутом пути не равна нулю. При перемещении единичного положительного заряда на замкнутом пути эта работа равна ЭДС индукции в неподвижном проводнике.

ЭДС индукции создаёт в проводнике индукционный ток. Величину индукционного тока можно определить по закону Ома, если известны сопротивление R проводника и его ЭДС индукции:

$$I = \frac{E}{R}.$$

Направление индукционного тока в прямолинейном проводнике можно определить по правилу правой руки (рис. 4.5). Руку нужно расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь, большой палец под углом 90° к ладони указывал на-

правление движения проводника. Тогда четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока.

Индукционный ток может возникать в роторе генератора, в сердечнике трансформатора, в любом проводнике, который находится в переменном магнитном поле. Сопротивление ротора генератора или сердечника трансформатора мало, поэтому возникают индукционные токи большой величины.

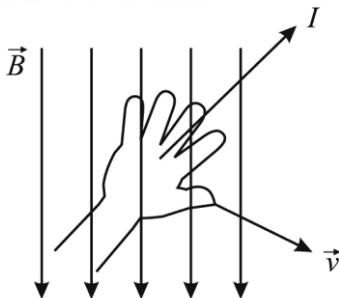


Рис. 4.5. Правило правой руки

Это вихревые токи или токи Фуко (по имени французского физика, который их исследовал). Вихревые токи нагревают проводник, при этом теряется энергия. Чтобы уменьшить токи Фуко, металлические части электрических машин выполняют из листов стали, покрытых изолятором (лаком или окисью железа). Вихревые токи в плоскости листа незначительны.

4.3. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

Вокруг любого проводника с током возникает магнитное поле. Если величина тока в проводнике изменяется, то изменяется и его магнитное поле. По закону Фарадея переменное магнитное поле создаёт в этом же проводнике индукционный ток. Это явление называется самоиндукцией, а ЭДС, которая создаёт индукционный ток при самоиндукции, называется ЭДС самоиндукции. Причина ЭДС — сам проводник. По правилу Ленца ЭДС самоиндукции противодействует изменению тока в проводнике. Если ток увеличивается, ЭДС самоиндукции противодействует этому увеличению, ток нарастает более медленно. Когда ток достигает постоянной величины, изменение магнитного потока прекращается и ЭДС

самоиндукции равна нулю. При уменьшении тока ЭДС самоиндукции противодействует его уменьшению, заставляет его уменьшаться постепенно.

Явление самоиндукции в электрических цепях можно сравнить с инерцией в механике. Нельзя мгновенно увеличить скорость тела и нельзя мгновенно остановить его. Чтобы увеличить скорость тела, нужно совершить работу. При торможении тело само совершает работу. Аналогично этому для создания тока нужно совершить работу против вихревого электрического поля. При уменьшении тока до нуля это поле само совершает работу.

Рассмотрим, какие свойства проводника определяют величину ЭДС самоиндукции, возникающей в нём. Магнитная индукция, создаваемая током, прямо пропорциональна силе тока. А магнитный поток прямо пропорционален магнитной индукции.

$$\Phi \sim B \sim I \quad \text{или} \quad \Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности, который называется *индуктивностью*.

Используя закон Фарадея, ЭДС самоиндукции можно выразить так:

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Индуктивность — это физическая величина, численно равная ЭДС самоиндукции, которая возникает в контуре при изменении силы тока на единицу за одну секунду.

Индуктивность является геометрической характеристикой проводника: она зависит от его размеров и формы, но не зависит от тока в проводнике. Индуктивность прямолинейного проводника очень мала. Чем больше витков в катушке, тем больше ее индуктивность и тем большая ЭДС самоиндукции возникает в ней.

Индуктивность катушки увеличивается при внесении внутрь катушки сердечника из ферромагнитного материала. Индуктивность катушки прямо пропорциональна магнитной проницаемости сердечника μ_{abc} .

Единица индуктивности в СИ — генри: $[L] = 1 \text{ Гн}$. Если при изменении силы тока в 1 А за 1 с в проводнике возникает ЭДС индукции 1 В, то индуктивность такого проводника равна 1 Гн.

Упражнение 4.2

1. Какое явление называется самоиндукцией?
2. Что называется индуктивностью?
3. Какая единица индуктивности в СИ?
4. По катушке индуктивностью 80 мГн проходит постоянный ток 2 А. Определить время убывания тока при размыкании цепи, если ЭДС самоиндукции равна – 16 В. (Ответ: 0,01 с).
5. Определить энергию магнитного поля катушки, состоящей из 200 витков, если при силе тока 4 А в ней возникает магнитный поток, равный 0,01 Вб. (Ответ: 4 Дж).
6. Возникнет ли ЭДС самоиндукции в катушке, по которой проходит постоянный (переменный) ток? Почему?
7. Катушка сопротивлением 100 Ом, состоящая из 1000 витков площадью 5 см² каждый, внесена в однородное магнитное поле. В течение некоторого времени индукция поля уменьшилась от 0,8 до 0,3 Тл. Какой заряд индуцирован в проводнике за это время? (Ответ: $2,5 \cdot 10^{-3}$ Кл).
8. Какой индукционный ток называется вихревым и почему он обладает сильным тепловым действием?
9. Сложенная вдвое проволока движется в магнитном поле перпендикулярно его линиям индукции. Возникнет ли ЭДС индукции в проволоке? Объяснить.
10. От чего зависит индуктивность проводника? Написать формулу для определения индуктивности катушки.

4.4. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Все вещества без исключения обладают в той или иной мере магнитными свойствами. Магнитные материалы находят самое широкое применение в современной технике. В генераторах, трансформаторах и реле используют специальные сорта стали с заданными магнитными свойствами. Изучение магнитных свойств вещества важно также и для правильного понимания самой природы вещества. В настоящее время установлено, что электроны, протоны, нейтроны, атомные ядра и атомы в целом обладают магнитными свойствами. Так, например, магнитные свойства электрона примерно в 1000 раз сильнее магнитных свойств протона или ней-

трона. Поэтому магнитные свойства атомов главным образом определяют электронами.

Одним из основных свойств электрона является существование вокруг него электромагнитного поля. С электрической составляющей этого поля связан заряд e , а с магнитной — особая величина, называемая *спиновым магнитным моментом* или *спином*. Кроме того, электрон в атоме непрерывно движется вокруг ядра, а такое движение можно представить в виде модели элементарного кругового тока I , магнитное поле которого характеризуется *орбитальным магнитным моментом* $p = iS$. Сила тока, создаваемая вращением электрона, равна $i = ev$, где v — частота. Площадь, описываемая электроном при движении по орбите радиусом r , будет $S = \pi r^2$. Таким образом, орбитальный магнитный момент электрона $p = \pi e r^2 v$.

Количественной характеристикой магнитных полей электронов, электрического тока и любых намагниченных тел является *магнитный момент*. Результирующий магнитный момент определяет силы, которые действуют на электроны, витки с током или любые намагниченные тела при помещении их во внешнее магнитное поле. Магнитные моменты всех электронов имеют одинаковые модули и направлены вдоль осей вращения. Для данного атома орбитальные и спиновые моменты каждого электрона могут быть направлены с магнитными моментами остальных электронов только или параллельно, или антипараллельно (навстречу) друг другу. Магнитные моменты пары электронов в случае антипараллельного направления взаимно компенсируются.

Для количественной оценки магнитного поля внутри испытуемых веществ широко используют две физические величины — намагниченность материала J и его *магнитную восприимчивость* χ .

Намагниченность — это векторная сумма, равная отношению магнитных моментов атомов к объёму вещества.

Если вещество изотропно, занимает объём V и во внешнем однородном магнитном поле с вектором магнитной индукции \vec{B}_0 приобретает суммарный магнитный момент p_m , то намагниченность материала $J = p_m / V$.

Величина J показывает, насколько магнитная индукция B магнитного поля в ферромагнетике больше магнитной индукции B_0 внешнего поля в вакууме. Связь между J , B , B_0 выражается формулой $J = B - B_0$.

Вектор намагниченности \vec{J} определяет магнитное поле, создаваемое самим веществом, а вектор магнитной индукции \vec{B} характеризует суммарное магнитное поле в веществе, создаваемое как внешними, так и внутренними возбудителями.

При включении внешнего магнитного поля на магнитные моменты отдельных атомов будет действовать крутящий момент, стремящийся повернуть их по направлению вектора напряжённости. Тепловое хаотическое движение атомов создаёт дезориентацию магнитных моментов. Но чем сильнее поле, тем у большего числа атомов напряжение магнитного момента будет совпадать с силовыми линиями внешнего поля и тем сильнее намагнитится вещество. Вектор намагниченности вещества в относительно слабых магнитных полях определяется формулой

$$\vec{J} = \chi \vec{B}_0. \quad (4.1)$$

Подставим в формулу (4.1) выражения $J = \chi B_0$ и $B = \mu B_0$, получим $\chi B_0 = \mu B_0 - B_0$. Отсюда находим соотношение между магнитной восприимчивостью χ и магнитной проницаемостью μ :

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

При исследовании магнитных свойств вещества Фарадей описал отличительные признаки явлений ферромагнетизма, парамагнетизма и диамагнетизма.

Ферромагнетизм обусловлен наличием нескомпенсированных спинов в недостроенных электронных оболочках и кристаллической структурой, при которой возникают области самопроизвольного намагничивания. Для ферромагнитных веществ магнитная проницаемость сильно зависит от напряжённости намагничивающего поля. Процесс намагничивания ферромагнетиков зависит от их предыдущего состояния. Ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт и др.

Парамагнетики — слабомагнитные вещества, характерным свойством которых является то, что для них μ не зависит от напря-

жённости H намагничивающего поля. При обычных температурах парамагнетиками являются литий, натрий, калий, магний, платина.

Диаманетики — это вещества, атомы которых имеют структуру, при которой орбитальные магнитные моменты и спины всех электронов взаимно скомпенсированы. Атом в целом не имеет магнитного момента. Диамангнитными свойствами обладают висмут, медь, золото, цинк. Диамангнетизм — одно из наиболее сложных явлений природы. Физическая сущность его заключается в возникновении во всём объёме вещества (согласно закону Ленца) индуцированных внешним полем незатухающих электрических микроскопических вихревых токов.

 *Это интересно!*

Петр Леонидович Капица (1894 – 1984) — российский физик, ученик Резерфорда. Один из основателей физики сильных магнитных полей. Получил рекордные значения поля, изучал его влияние на физические свойства веществ. Признанный авторитет в физике низких температур. Разработал технику получения жидких газов, открыл явление сверхтекучести. Занимался электроникой больших мощностей, выдвинул гипотезу о природе шаровой молнии.

Упражнение 4.3

1. Обладают ли электроны, атомные ядра и атомы в целом магнитными свойствами?
2. Какая величина характеризует магнитные свойства среды?
3. Каково различие между векторами намагниченности и магнитной индукции?
4. Что называется магнитной восприимчивостью?
5. Какова связь между магнитной проницаемостью μ и магнитной восприимчивостью χ ?
6. Чем обусловлено явление ферромагнетизма?
7. Какие вещества называются диамангнетиками?
8. В чем заключается физическая сущность диамангнетизма?
9. Катушка длиной 30 см имеет 1000 витков. Найти напряжённость магнитного поля внутри катушки, если по ней проходит ток 2 А. Диаметр катушки считать малым по сравнению с её длиной. (Ответ: 6,67 кА/м).

5. СВЕТОВЫЕ КВАНТЫ. ДЕЙСТВИЕ СВЕТА

В конце XIX века была открыта новая фундаментальная физическая константа — *постоянная Планка* и возникла новая наука — *квантовая физика*. Заслуга в этом принадлежит выдающемуся немецкому физическому Макс Планку. Ему удалось решить проблему спектрального распределения света, излучаемого нагретыми телами, перед которой классическая физика оказалась бессильной. Планк первым высказал гипотезу о квантовании энергии осциллятора (колебательной системы), несовместимую с принципами классической физики. Именно эта гипотеза, развитая впоследствии трудами многих выдающихся физиков, дала толчок процессу пересмотра и ломки старых понятий, который завершился созданием квантовой физики.

5.1. ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТЕЛ

Тела, нагретые до достаточно высоких температур, светятся. Свечение тел, обусловленное нагреванием, называется *тепловым* (температурным) излучением. Тепловое излучение, являясь самым распространенным в природе, совершается за счет энергии теплового движения атомов и молекул вещества (т. е. за счет его внутренней энергии) и свойственно всем телам при температуре выше 0 К. Тепловое излучение характеризуется сплошным спектром, положение максимума которого зависит от температуры. При высоких температурах излучаются короткие (видимые и ультрафиолетовые) электромагнитные волны, при низких — преимущественно длинные (инфракрасные).

Тепловое излучение — практически единственный вид излучения, который может быть *равновесным*. Предположим, что нагретое (излучающее) тело помещено в полость, ограниченную идеально отражающей оболочкой. С течением времени, в результате непрерывного обмена энергией между телом и излучением, наступит равновесие, т. е. тело в единицу времени будет поглощать столько же энергии, сколько и излучать. Допустим, что равновесие между телом и излучением по какой-либо причине нарушено и тело излучает энергии больше, чем поглощает. Если в единицу времени тело больше излучает, чем поглощает (или наоборот), то температура тела начнет понижаться (или повышаться). В результате

будет ослабляться (или возрастать) количество излучаемой телом энергии, пока, наконец, не установится равновесие. Все другие виды излучения неравновесны. Плотность энергии равновесного излучения и его спектральный состав зависят только от температуры.

Из-за равновесного характера теплового излучения к нему можно применять законы термодинамики.

Если в замкнутую полость с зеркально отражающими стенками поместить несколько тел, нагретых до различной температуры, то, как показывает опыт, такая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия, при котором все тела приобретают одинаковую температуру. Тела обмениваются энергией только путем испускания и поглощения лучистой энергии. Если через малое отверстие заглянуть внутрь полости, в которой установилось термодинамическое равновесие между излучением и нагретыми телами, то глаз не различит очертаний тел и зафиксирует лишь однородное свечение всей полости в целом.

Пусть одно из тел в полости обладает свойством поглощать всю падающую на его поверхность лучистую энергию любого спектрального состава. Такое тело называют *абсолютно чёрным*.

Абсолютно черных тел в природе не бывает. Хорошей моделью такого тела является небольшое отверстие в замкнутой полости (рис. 5.1.).

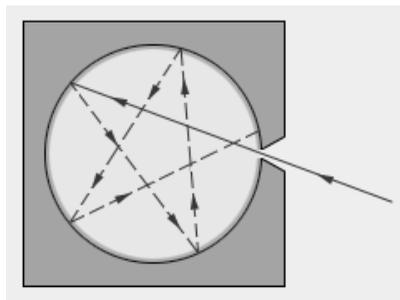


Рис. 5.1. Модель абсолютно чёрного тела

Свет, падающий через отверстие внутрь полости, после многочисленных отражений будет практически полностью поглощен стенками, и снаружи отверстие будет казаться совершенно чёрным. Но если полость нагрета до определенной температуры T , и внутри установилось тепловое равновесие, то собственное излучение по-

лости, выходящее через отверстие, будет излучением абсолютно чёрного тела. Именно таким образом во всех экспериментах по исследованию теплового излучения моделируется абсолютно чёрное тело.

При заданной температуре собственное тепловое излучение абсолютно чёрного тела, находящегося в состоянии теплового равновесия с излучением, должно иметь тот же спектральный состав, что и окружающее это тело равновесное излучение. В противном случае равновесие между абсолютно чёрным телом и окружающим его излучением не могло бы установиться. Поэтому задача сводится к изучению спектрального состава излучения абсолютно чёрного тела. Решить эту задачу классическая физика оказалась не в состоянии.

Слова и словосочетания

квантовая физика	свет
гипотеза	ультрафиолетовое
излучение	инфракрасное
спектр	равновесное
абсолютно чёрное	поглощать

Упражнение 5.1

1. Что называется тепловым излучением?
2. Охарактеризовать тепловое излучение.
3. Какое тело называется абсолютно чёрным?
4. Что является моделью абсолютно чёрного тела?

5.2. ГИПОТЕЗА ПЛАНКА

Макс Планк первым понял, что объяснить существование теплового равновесного излучения, основываясь на известных и хорошо проверенных законах электродинамики Максвелла и механики Ньютона, нельзя.

Планк пришел к выводу, что процессы излучения и поглощения электромагнитной энергии нагретым телом происходят не непрерывно, как это принимала классическая физика, а конечными порциями — *квантами*. Квант — это минимальная порция энергии, излучаемой или поглощаемой телом. По теории Планка, энергия кванта E прямо пропорциональна частоте света:

$$E = h\nu,$$

где h — постоянная Планка.

Гипотеза Планка позволяет понять, почему при больших частотах энергия излучения оказывается не только не бесконечной, а, напротив, практически равной нулю.

Планк построил теорию равновесного теплового излучения, полностью согласующуюся с экспериментом. По известному из опыта распределению энергии по частотам была определена величина постоянной Планка: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

На основе гипотезы о прерывистом характере процессов излучения и поглощения телами электромагнитного излучения Планк получил формулу для спектральной светимости абсолютно чёрного тела. Формулу Планка удобно записывать в форме, выражающей распределение энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела по частотам ν , а не по длинам волн λ :

$$r(\nu, T) = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

где c — скорость света, h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Формула Планка хорошо описывает спектральное распределение излучения чёрного тела при любых частотах. Она прекрасно согласуется с экспериментальными данными.

Решение проблемы излучения чёрного тела ознаменовало начало новой эры в физике. Нелегко было примириться с отказом от классических представлений, и сам Планк, совершив великое открытие, в течение нескольких лет безуспешно пытался понять квантование энергии с позиции классической физики.

Слова и словосочетания

порция энергии	квант
частота света	прерывистый
спектральное распределение	открытие
релятивистская частица	квантование энергии



Это интересно!

Макс Планк (1858–1947) — немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики. Лауреат Нобелевской премии по физике

(1918) и других наград, член Прусской академии наук (1894), ряда иностранных научных обществ и академий наук. На протяжении многих лет один из руководителей немецкой науки. Применив к проблеме равновесного теплового излучения методы электродинамики и термодинамики, Планк получил закон распределения энергии в спектре абсолютно чёрного тела (формула Планка) и обосновал этот закон, введя представление о квантах энергии и кванте действия. Это достижение положило начало развитию квантовой физики. Планк впервые вывел уравнения динамики релятивистской частицы и заложил основы релятивистской термодинамики.

5.3. ФОТОЭФФЕКТ

Фотоэффект был открыт в 1887 году немецким физиком Г. Герцем и в 1888 – 1890 годах экспериментально исследован А. Г. Столетовым. Наиболее полное исследование явления фотоэффекта было выполнено Ф. Ленардом в 1900 г. К этому времени уже был открыт электрон (1897 г., Дж. Томсон), и стало ясно, что фотоэффект (или точнее — внешний фотоэффект) состоит в вырывании электронов из вещества под действием падающего на него света.

Схема экспериментальной установки для исследования фотоэффекта изображена на рис. 5.2.

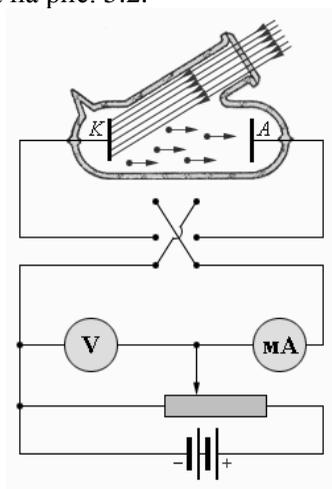


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки для изучения фотоэффекта

В экспериментах использовался стеклянный вакуумный баллон с двумя металлическими электродами, поверхность которых была тщательно очищена. К электродам прикладывалось некоторое напряжение U , полярность которого можно было изменять с помощью двойного ключа. Один из электродов (катод K) через кварцевое окошко освещался монохроматическим светом некоторой длины волны λ .

При неизменном световом потоке снималась зависимость силы фототока I от приложенного напряжения. На рис. 5.3. изображены типичные кривые такой зависимости, полученные при двух значениях интенсивности светового потока, падающего на катод.

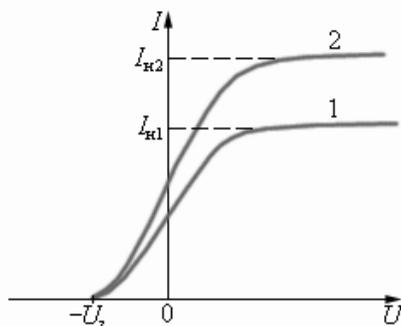


Рис. 5.3. Зависимость силы фототока от приложенного напряжения

Кривая 2 соответствует большей интенсивности светового потока. $I_{н1}$ и $I_{н2}$ — токи насыщения, $U_з$ — запирающий потенциал.

Кривые показывают, что при достаточно больших положительных напряжениях на аноде A фототок достигает насыщения, так как все электроны, вырванные светом из катода, достигают анода. Тщательные измерения показали, что ток насыщения I_n прямо пропорционален интенсивности падающего света. Когда напряжение на аноде отрицательно, электрическое поле между катодом и анодом тормозит электроны. Анода могут достичь только те электроны, кинетическая энергия которых превышает $|eU|$. Если напряжение на аноде меньше, чем $-U_з$, фототок прекращается. Измеряя $U_з$, можно определить максимальную кинетическую энергию фотоэлектронов:

$$\left(\frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_3$$

К удивлению ученых, величина U_3 оказалась независимой от интенсивности падающего светового потока.

Многочисленными экспериментаторами были установлены следующие основные закономерности фотоэффекта:

1. Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов линейно возрастает с увеличением частоты света ν и не зависит от его интенсивности.

2. Для каждого вещества существует так называемая *красная граница фотоэффекта*, т. е. наименьшая частота ν_{\min} , при которой еще возможен внешний фотоэффект.

3. Число фотоэлектронов, вырываемых светом из катода за 1 с, прямо пропорционально интенсивности света.

4. Фотоэффект практически безынерционен, фототок возникает мгновенно после начала освещения катода при условии, что частота света $\nu > \nu_{\min}$.

Все эти закономерности фотоэффекта в корне противоречили представлениям классической физики о взаимодействии света с веществом. Согласно волновым представлениям при взаимодействии с электромагнитной световой волной электрон должен был бы постепенно накапливать энергию, и потребовалось бы значительное время, зависящее от интенсивности света, чтобы электрон накопил достаточно энергии для того, чтобы вылететь из катода. Как показывают расчеты, это время должно было бы исчисляться минутами или часами. Однако, опыт показывает, что фотоэлектроны появляются немедленно после начала освещения катода.

В этой модели также было невозможно понять существование красной границы фотоэффекта. Волновая теория света не могла объяснить независимость энергии фотоэлектронов от интенсивности светового потока и пропорциональность максимальной кинетической энергии частоте света.

Таким образом, электромагнитная теория света оказалась неспособной объяснить эти закономерности.

Обратите внимание!

1. Если электроды выходят за пределы освещаемого вещества, то фотоэффект называется *внешним фотоэффектом*. Внешний фотоэффект наблюдается в металлах.

2. Если электроны теряют связь только со своими атомами и молекулами, но остаются внутри вещества в качестве «свободных электронов», то явление называется *внутренним фотоэффектом*. Внутренний фотоэффект наблюдается у полупроводников и в меньшей степени у диэлектриков.

Слова и словосочетания

фотоэффект	вакуумный баллон
электрод	экспериментальная установка
закономерность	красная граница

Упражнение 5.2

1. Кто открыл фотоэффект?
2. В чём состоит явление фотоэффекта?
3. Описать экспериментальную установку для исследования фотоэффекта.
4. Сформулировать закономерности фотоэффекта.

5.4. ТЕОРИЯ ФОТОЭФФЕКТА. ФОТОНЫ

Выход был найден А. Эйнштейном в 1905 г. Теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта было дано Эйнштейном на основе гипотезы М. Планка о том, что свет излучается и поглощается определенными порциями, причем энергия каждой такой порции определяется формулой $E = h\nu$, где h — постоянная Планка.

Эйнштейн пришел к выводу, что свет имеет прерывистую (дискретную) структуру. Электромагнитная волна состоит из отдельных порций — квантов, впоследствии названных *фотонами*. При взаимодействии с веществом фотон целиком передает всю свою энергию $h\nu$ одному электрону. Часть этой энергии электрон может рассеять при столкновениях с атомами вещества. Кроме того, часть энергии электрона затрачивается на преодоление потенциального барьера на границе металл–вакуум.

Для этого электрон должен совершить *работу выхода* A , зависящую от свойств материала катода. Наибольшая кинетическая энергия, которую может иметь вылетевший из катода фотоэлектрон, определяется законом сохранения энергии:

$$\left(\frac{mv^2}{2} \right)_{\max} = eU_s = h\nu - A$$

Эту формулу принято называть *уравнением Эйнштейна для фотоэффекта*.

С помощью уравнения Эйнштейна можно объяснить все закономерности внешнего фотоэффекта. Из уравнения Эйнштейна следуют линейная зависимость максимальной кинетической энергии от частоты и независимость от интенсивности света, существование красной границы, безынерционность фотоэффекта. Общее число фотоэлектронов, покидающих за 1 с поверхность катода, должно быть пропорционально числу фотонов, падающих за то же время на поверхность. Из этого следует, что ток насыщения должен быть прямо пропорционален интенсивности светового потока.

Фотон, подобно частицам, обладает определённой порцией энергии $h\nu$. Его масса и импульс также дискретны, как у любых других частиц. Фотон движется в вакууме со скоростью c . Фотон не имеет массы покоя. Из общего соотношения специальной теории относительности, связывающего энергию, импульс и массу любой частицы

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2,$$

следует, что фотон обладает импульсом

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Направлен импульс света по световому лучу.

Из уравнения Эйнштейна можно определить постоянную Планка h . Для этого нужно знать частоту света ν , работу выхода A и измерить кинетическую энергию фотоэлектронов.

Такого рода измерения и расчёты дают то же самое значение $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, которое было найдено Планком при изучении совершенно другого явления — теплового излучения. Совпадение значений постоянной Планка, полученных различными методами,

— это сильный аргумент в пользу правильного предположения о прерывистом характере излучения и поглощения света веществом.

Итак, законы фотоэффекта свидетельствуют, что свет при испускании и поглощении ведет себя подобно потоку частиц, получивших название фотонов или световых квантов.

Таким образом, учение о свете, совершив виток длительностью в два столетия, вновь возвратилось к представлениям о световых частицах — корпускулах.

Но это не был механический возврат к корпускулярной теории Ньютона. В начале XX века стало ясно, что свет обладает двойственной природой. При распространении света проявляются его волновые свойства (интерференция, дифракция, поляризация), а при взаимодействии с веществом — корпускулярные (фотоэффект). Эта двойственная природа света получила название *корпускулярно-волнового дуализма*. Позже двойственная природа была открыта у электронов и других элементарных частиц. Классическая физика не может дать наглядной модели сочетания волновых и корпускулярных свойств у микрообъектов. Движением микрообъектов управляют не законы классической механики Ньютона, а законы квантовой механики. Теория излучения абсолютно черного тела, развитая М. Планком, и квантовая теория фотоэлектрического эффекта Эйнштейна лежат в основании этой современной науки.

 *Это интересно!*

Альберт Эйнштейн (1879 – 1955) — физик-теоретик, один из основателей современной теоретической физики, лауреат Нобелевской премии по физике 1921 года, общественный деятель-гуманист. Жил в Германии (1879–1893, 1914–1933), Швейцарии (1893–1914) и США (1933–1955). Почётный доктор около 20 ведущих университетов мира, член многих Академий наук. Эйнштейну принадлежит решающая роль в популяризации и введении в научный оборот новых физических концепций и теорий. В первую очередь это относится к пересмотру понимания физической сущности пространства и времени и к построению новой теории гравитации взамен ньютоновской. Эйнштейн также, вместе с Планком, заложил основы квантовой теории.

Упражнение 5.3

1. Кто дал теоретическое объяснение наблюдаемых закономерностей фотоэффекта?
2. Что называется фотонами?
3. Записать уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
4. Что выражает уравнение Эйнштейна для фотоэффекта?
5. Какими свойствами обладает фотон?
6. Как можно объяснить законы фотоэффекта на основании квантовой теории света?
7. Как можно объяснить красную границу фотоэффекта?
8. Какими свойствами одновременно обладает свет?

6. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

6.1. СТРОЕНИЕ АТОМА. ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества возникло еще в античные времена, но только в XVIII веке трудами А. Лавуазье, М.В. Ломоносова и других учёных была доказана реальность существования атомов. Но вопрос об их внутреннем устройстве даже не возникал, и атомы по-прежнему считались неделимыми частицами. В XIX веке изучение атомистического строения вещества существенно продвинулось вперед.

Первая модель атома на основе накопленных экспериментальных данных была создана английским физиком Дж. Томсоном в 1904 году. Он считал, что атом представляет собой электронейтральную систему шарообразной формы радиусом, примерно равным 10^{-10} м. Положительный заряд атома равномерно распределен по всему объему шара, а отрицательно заряженные электроны находятся внутри него (рис. 6.1.). Число электронов в атоме таково, что их отрицательные заряды в обычном состоянии компенсируют положительный заряд шара.

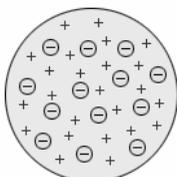


Рис. 6.1. Модель атома Дж. Томсона

Через несколько лет в опытах великого английского физика Э. Резерфорда было доказано, что модель Томсона неверна. Чтобы проверить правильность модели, предложенной Дж. Томпсоном, Э. Резерфорд произвёл классические опыты по рассеянию α -частиц. Резерфорд предложил применить зондирование атома с помощью α -частиц, которые возникают при радиоактивном распаде радия и некоторых других элементов. Масса α -частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду. В своих опытах Резерфорд использовал α -частицы с кинетической энергией около 5 МэВ (скорость таких частиц очень велика – порядка 10^7 м/с, но все же значительно меньше скорости света). α -частицы – это полностью ионизированные атомы гелия. Они были открыты Резерфордом в 1899 году при изучении явления *радиоактивности*. Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию α -частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения α -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома. Схема опыта Резерфорда представлена на рис. 6.2.

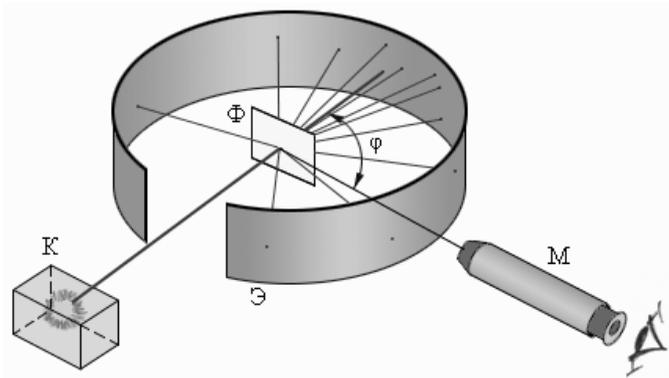


Рис. 6.2. Схема опыта Резерфорда по рассеянию α -частиц:
 К — свинцовый контейнер с радиоактивным веществом, Э — экран, покрытый сернистым цинком, Ф — золотая фольга,
 М — микроскоп

От радиоактивного источника, заключенного в свинцовый контейнер К, α -частицы направлялись на тонкую металлическую фольгу Ф. Рассеянные частицы попадали на экран Э, покрытый слоем кристаллов сульфида цинка, способных светиться под ударами быстрых заряженных частиц. Сцинтилляции (вспышки) на экране наблюдались глазом с помощью микроскопа М. Наблюдения рассеянных α -частиц в опыте Резерфорда можно было проводить под различными углами φ к первоначальному направлению пучка. Было обнаружено, что большинство α -частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие 30° . Очень редкие α -частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к 180° .

Этот результат был совершенно неожиданным даже для Резерфорда. Его представления находились в резком противоречии с моделью атома Томсона, согласно которой положительный заряд распределен по всему объему атома. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить α -частицы назад. Электрическое поле однородного заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля по мере приближения к центру шара. Если бы радиус шара, в котором сосредоточен весь положительный заряд атома, уменьшился в n раз, то максимальная сила отталкивания, действующая на α -частицу, по закону Кулона возросла бы в n^2 раз. Следовательно, при достаточно большом значении n α -частицы могли бы испытать рассеяние на большие углы вплоть до 180° .

Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его положительный заряд сосредоточен в малом объёме. Эту часть атома Резерфорд назвал *атомным ядром*. Так возникла *ядерная модель* атома.

В 1911 году Э. Резерфорд предложил *планетарную модель атома*. Согласно этой модели, в центре атома располагается положительно заряженное ядро. Ядро занимает только 10^{-12} часть полного объема атома, но содержит весь положительный заряд и не менее 99,95 % его массы. Атом в целом нейтрален. Вокруг ядра, подобно планетам, под действием кулоновских сил со стороны яд-

ра вращаются электроны (рис. 6.3). Находиться в состоянии покоя электроны не могут, так как они упали бы на ядро. Заряд ядра должен быть равен суммарному заряду всех электронов, входящих в состав атома. Впоследствии удалось установить, что если заряд электрона принять за единицу, то заряд ядра в точности равен номеру данного элемента в таблице Менделеева.

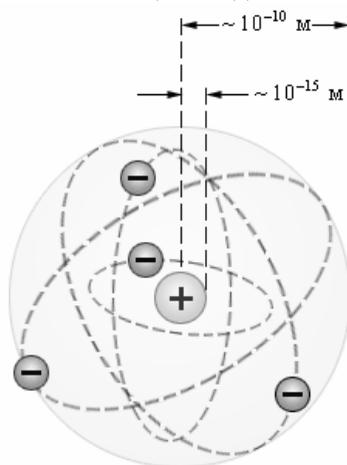


Рис. 6.3. Планетарная модель атома Резерфорда

Планетарная модель атома, предложенная Резерфордом, несомненно явилась крупным шагом вперед в развитии знаний о строении атома. Однако она оказалась неспособной объяснить сам факт длительного существования атома, т. е. его устойчивость. По законам классической электродинамики, движущийся с ускорением заряд должен излучать электромагнитные волны, уносящие энергию. За короткое время (порядка 10^{-8} с) все электроны в атоме Резерфорда должны растратить всю свою энергию и упасть на ядро. То, что этого не происходит в устойчивых состояниях атома, показывает, что внутренние процессы в атоме не подчиняются классическим законам.

 *Это интересно!*

Резерфорд Эрнест (1871 — 1937) — английский физик, заложивший основы учения о радиоактивности и строении атома;

он первый осуществил искусственное превращение элементов. Открыл альфа- и бета-излучение, короткоживущий изотоп радона (их несколько, сам радон ранее открыл немецкий химик) и множество изотопов. Объяснил на основе свойств радона радиоактивность тория, открыл и объяснил радиоактивное превращение химических элементов, создал теорию радиоактивного распада, расщепил атом азота, обнаружил протон. Доказал, что альфа-частица — ядро гелия.

Слова и словосочетания

неделимый	модель атома
зондирование	устойчивое состояние
радиоактивность	планетарная модель

Упражнение 6.1

1. Кем и когда была создана первая модель атома?
2. Описать модель атома Дж. Томсона.
3. Какой опыт провёл Резерфорд?
4. Описать планетарную модель атома.
5. Когда была предложена планетарная модель атома?

6.2. КВАНТОВЫЕ ПОСТУЛАТЫ БОРА

Следующий шаг в развитии представлений об устройстве атома в 1913 году сделал выдающийся датский физик Н. Бор. Проанализировав всю совокупность опытных фактов, Бор пришел к выводу, что при описании поведения атомных систем следует отказаться от многих представлений классической физики. Он сформулировал постулаты, которым должна удовлетворять новая теория о строении атомов.

Первый постулат Бора (постулат стационарных состояний) гласит: атомная система может находиться только в особых стационарных или квантовых состояниях, каждому из которых соответствует определенная энергия E_n . В стационарных состояниях атом не излучает.

Согласно первому постулату Бора, атом характеризуется системой *энергетических уровней*, каждый из которых соответствует определенному стационарному состоянию. Механическая энергия электрона, движущегося по замкнутой траектории вокруг положи-

тельно заряженного ядра, отрицательна. Поэтому всем стационарным состояниям соответствуют значения энергии $E_n < 0$. При $E_n \geq 0$ электрон удаляется от ядра, т. е. происходит ионизация. Величина $|E_1|$ называется *энергией ионизации*. Состояние с энергией E_1 называется *основным состоянием* атома.

Второй постулат Бора (правило частот) формулируется следующим образом: при переходе атома из одного стационарного состояния с энергией E_n в другое стационарное состояние с энергией E_m излучается или поглощается квант, энергия которого равна разности энергий стационарных состояний:

$$h\nu_{nm} = E_n - E_m,$$

где h — постоянная Планка. Отсюда можно выразить частоту излучения:

$$\nu_{nm} = \frac{E_n - E_m}{h}.$$

Второй постулат Бора также противоречит электродинамике Максвелла, так как частота излучения определяется только изменением энергии атома и никак не зависит от характера движения электрона.

Теория Бора при описании поведения атомных систем не отвергла полностью законы классической физики. В ней сохранились представления об орбитальном движении электронов в кулоновском поле ядра. Классическая ядерная модель атома Резерфорда в теории Бора была дополнена идеей о квантовании электронных орбит. Поэтому теорию Бора иногда называют *полуклассической*.

Слова и словосочетания

постулат	стационарное состояние
энергетический уровень	энергия ионизации

Упражнение 6.2

1. Сформулировать постулат стационарных состояний.
2. Чем согласно первому постулату Бора характеризуется атом?
3. Сформулировать правило частот.
4. Чем была дополнена классическая ядерная модель атома?

6.3. СТРОЕНИЕ АТОМНОГО ЯДРА. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА

К 20-м годам XX века физики уже не сомневались в том, что атомные ядра, открытые Э. Резерфордом, также как и сами атомы, имеют сложную структуру. В этом их убеждали многочисленные экспериментальные факты, накопленные к этому времени: открытие радиоактивности, экспериментальное доказательство ядерной модели атома, измерение отношения e/m для электрона, α -частицы и для так называемой Н-частицы — ядра атома водорода, открытие искусственной радиоактивности и ядерных реакций, измерение зарядов атомных ядер и т. д.

В настоящее время твердо установлено, что атомные ядра различных элементов состоят из частиц двух видов — *протонов* и *нейтронов*.

Протон представляет собой атом водорода, из которого удален единственный электрон. Эта частица наблюдалась уже в 1907 г. в опытах Дж. Томсона, которому удалось измерить у нее отношение e/m . В 1919 году Э. Резерфорд обнаружил ядра атома водорода в продуктах расщепления ядер атомов многих элементов. Резерфорд назвал эту частицу протоном. Он высказал предположение, что протоны входят в состав всех атомных ядер.

По современным измерениям, положительный заряд протона в точности равен элементарному заряду $e = 1,60217733 \cdot 10^{-19}$ Кл, то есть равен по модулю отрицательному заряду электрона. В настоящее время равенство зарядов протона и электрона проверено с точностью 10^{-22} . Масса протона равна $m_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$ кг.

Нейтрон — это элементарная частица. Ее не следует представлять в виде компактной протон-электронной пары, как первоначально предполагал Резерфорд. Ученик Резерфорда Д. Чедвик, проверяя предположения на опыте, обнаружил, что в результате облучения бериллия α -частицами возникает поток тяжелых частиц, обладающих большой проникающей способностью. Эти частицы непосредственно не ионизировали газ, что свидетельствовало об их электрической нейтральности. Эти частицы и были названы нейтронами. Масса нейтрона $m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,008665 а. е. м. Масса нейтрона приблизительно на две электронные массы превосходит массу протона.

После открытия нейтрона российский ученый Д.Д. Иваненко и немецкий физик В. Гейзенберг выдвинули гипотезу о *протонно-нейтронном* строении атомных ядер, которая полностью подтвердилась последующими исследованиями. Протоны и нейтроны принято называть *нуклонами*.

Для характеристики атомных ядер вводится ряд обозначений. Число протонов, входящих в состав атомного ядра, обозначают символом Z и называют *зарядовым числом* или атомным номером (это порядковый номер в периодической таблице Менделеева). Заряд ядра равен Ze , где e — элементарный заряд. Число нейтронов обозначают символом N .

Общее число нуклонов (т. е. протонов и нейтронов) называют *массовым числом* A :

$$A = Z + N$$

Число протонов в ядре равно числу электронов в атомной оболочке, так как атом в целом электронейтрален.

Одной из важнейших величин, характеризующих устойчивость атомного ядра, является *энергия связи*.

Энергией связи ядра называется энергия, необходимая для полного расщепления ядра на составляющие его нуклоны.

Энергия связи зависит от числа нуклонов, входящих в состав атомного ядра, поэтому часто пользуются понятием *удельной энергии связи*, т.е. энергией, приходящейся на один нуклон. Удельная энергия связи в среднем равна 8 МэВ на нуклон.

Слова и словосочетания

протон	нейтрон
нуклон	зарядовое число
энергия связи	расщепление

Упражнение 6.3

1. Из каких частиц состоят атомные ядра?
2. Что представляет собой протон?
3. Чему равен заряд протона?
4. Что такое нейтрон?
5. Что называется зарядовым числом?
6. Что такое энергия связи?

6.4. РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Почти 90 % из 2500 известных атомных ядер нестабильны. Нестабильное ядро самопроизвольно превращается в другие ядра с испусканием определённого вида излучения. Это свойство ядер называется *радиоактивностью*.

Явление радиоактивности было открыто в 1896 году французским физиком А. Беккерелем. Различают естественную и искусственную радиоактивность. *Естественная радиоактивность* наблюдается, как правило у тяжелых элементов, располагающихся в конце периодической системы. Радиоактивное излучение оказалось самопроизвольным и постоянным, оно не зависит от внешних условий: освещения, давления, температуры. Это означает, что радиоактивность представляет собой внутреннее свойство атомов радиоактивного элемента.

Явление *искусственной радиоактивности* было открыто в 1934 году французскими физиками Ирен Жолио Кюри и Фредериком Кюри при исследовании реакции облучения ядер алюминия α -частицами. В результате получается искусственный изотоп фосфора, который является радиоактивным и в течение 2,53 мин распадается с испусканием позитрона и образованием ядра кремния.

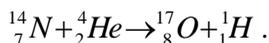
Радиоактивные ядра могут испускать частицы трех видов: положительно и отрицательно заряженные и нейтральные. Эти три вида излучений были названы α -, β - и γ -излучениями. Эти три вида радиоактивных излучений сильно отличаются друг от друга по способности ионизировать атомы вещества и, следовательно, по проникающей способности. Исследования показали: 1) α -излучение состоит из положительно заряженных ядер гелия (α -частиц), обладает наименьшей проникающей способностью; 2) β -излучение оказалось потоком электронов (β -частиц, летящих со скоростью, близкой к скорости света), β -лучи гораздо меньше поглощаются веществом; 3) γ -излучение, не отклоняющееся магнитным полем, представляет собой жесткое электромагнитное излучение большой проникающей способности, по свойствам напоминающее рентгеновское излучение высокой энергии, скорость распространения γ -излучения близка к скорости распространения света в вакууме.

Ядерная реакция — это процесс взаимодействия атомного ядра с другим ядром или элементарной частицей, сопровождаю-

щийся изменением состава и структуры ядра и выделением вторичных частиц или γ -квантов.

В результате ядерных реакций могут образовываться новые радиоактивные изотопы, которых нет на Земле в естественных условиях.

Первая ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году в опытах по обнаружению протонов в продуктах распада ядер. Резерфорд бомбардировал атомы азота α -частицами. При соударении частиц происходила ядерная реакция, протекавшая по следующей схеме:



При ядерных реакциях выполняется несколько *законов сохранения*: импульса, энергии, момента импульса, заряда. В дополнение к этим классическим законам при ядерных реакциях выполняется закон сохранения *барионного заряда* (т. е. числа нуклонов — протонов и нейтронов). Выполняется также ряд других законов сохранения, специфических для ядерной физики и физики элементарных частиц.

Ядерные реакции могут протекать при бомбардировке атомов быстрыми заряженными частицами (протоны, нейтроны, α -частицы, ионы).

Однако наиболее интересными для практического использования являются реакции, протекающие при взаимодействии ядер с нейтронами. Так как нейтроны лишены заряда, они беспрепятственно могут проникать в атомные ядра и вызывать их превращения. Выдающийся итальянский физик Э. Ферми первым начал изучать реакции, вызываемые нейтронами. Он обнаружил, что ядерные превращения вызываются не только быстрыми, но и медленными нейтронами, движущимися с тепловыми скоростями. Ядро тяжелого элемента делится на несколько частей с одновременным испусканием двух-трёх нейтронов и γ -излучения. При этом выделяется значительное количество энергии.

Ядерные реакции могут протекать с выделением ($Q > 0$) или с поглощением энергии ($Q < 0$). Во втором случае первоначальная кинетическая энергия исходных продуктов должна превышать величину $|Q|$, которая называется *порогом реакции*.

Для того чтобы ядерная реакция имела положительный энергетический выход, удельная энергия связи нуклонов в ядрах исходных продуктов должна быть меньше удельной энергии связи нуклонов в ядрах конечных продуктов.

Возможны два принципиально различных способа освобождения ядерной энергии: 1) деление тяжелых ядер; 2) реакции синтеза легких ядер.

Слова и словосочетания

естественная радиоактивность	облучение
искусственная радиоактивность	излучение
ядерная реакция	порог реакции

Упражнение 6.4

1. Какое свойство ядер называется радиоактивностью?
2. Какие различают виды радиоактивности?
3. Кем и когда было открыто явление радиоактивности?
4. Назвать природу и состав радиоактивного излучения.

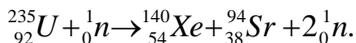
6.5. ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Реакции деления — это процесс, при котором нестабильное ядро делится на два крупных фрагмента сравнимых масс. При такой реакции выделяется большая энергия и, кроме того, вылетает несколько нейтронов, которые могут вызвать деление соседних ядер вещества. Такие реакции называются *цепными*.

В 1939 году немецкими учеными О.Ганом и Ф.Штрассманом было открыто деление ядер урана. Продолжая исследования, начатые Ферми, они установили, что при бомбардировке урана нейтронами возникают элементы средней части периодической системы — радиоактивные изотопы бария ($Z = 56$), криптона ($Z = 36$) и др.

Уран встречается в природе в виде двух изотопов: ${}_{92}^{238}\text{U}$ (99,3 %) и ${}_{92}^{235}\text{U}$ (0,7 %). При бомбардировке нейтронами ядра обоих изотопов могут расщепляться на два осколка. При этом реакция деления ${}_{92}^{235}\text{U}$ наиболее интенсивно идет на медленных (тепловых) нейтронах, в то время как ядра ${}_{92}^{238}\text{U}$ вступают в реакцию деления только с быстрыми нейтронами с энергией порядка 1 МэВ.

Основной интерес для ядерной энергетики представляет реакция деления ядра ${}_{92}^{235}\text{U}$. В настоящее время известны около 100 различных изотопов с массовыми числами примерно от 90 до 145, возникающих при делении этого ядра. Две типичные реакции деления этого ядра имеют вид:



В результате деления ядра, инициированного нейтроном, возникают новые нейтроны, способные вызвать реакции деления других ядер. Продуктами деления ядер урана-235 могут быть и другие изотопы бария, ксенона, стронция, рубидия и т. д.

Кинетическая энергия, выделяющаяся при делении одного ядра урана, огромна — порядка 200 МэВ. Продукты деления ядра урана нестабильны, так как в них содержится значительное избыточное число нейтронов. Поэтому ядра-осколки испытывают серию последовательных β -распадов, в результате которых число протонов в ядре увеличивается, а число нейтронов уменьшается до тех пор, пока не образуется стабильное ядро.

При делении ядра урана-235, которое вызвано столкновением с нейтроном, освобождается 2 или 3 нейтрона. При благоприятных условиях эти нейтроны могут попасть в другие ядра урана и вызвать их деление. На этом этапе появятся уже от 4 до 9 нейтронов, способных вызвать новые распады ядер урана и т. д. Такой лавинообразный процесс называется *цепной реакцией*. Схема развития цепной реакции деления ядер урана представлена на рис. 6.4.

Для осуществления цепной реакции необходимо, чтобы так называемый *коэффициент размножения нейтронов* был больше единицы. Другими словами, в каждом последующем поколении нейтронов должно быть больше, чем в предыдущем. Коэффициент размножения определяется не только числом нейтронов, образующихся в каждом элементарном акте, но и условиями, в которых протекает реакция — часть нейтронов может поглощаться другими ядрами или выходить из зоны реакции. Нейтроны, освободившиеся при делении ядер урана-235, способны вызвать деление лишь ядер этого же урана, на долю которого в природном уране приходится

всего лишь 0,7 %. Такая концентрация оказывается недостаточной для начала цепной реакции. Изотоп $^{238}_{92}\text{U}$ также может поглощать нейтроны, но при этом не возникает цепной реакции.

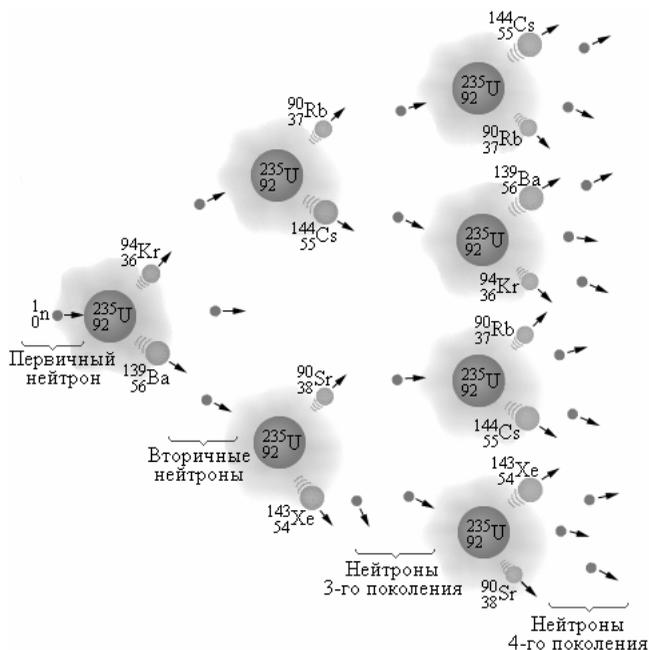


Рис. 6.4. Схема развития цепной реакции

Цепная реакция в уране с повышенным содержанием урана-235 может развиваться только тогда, когда масса урана превосходит так называемую *критическую массу*. В небольших кусках урана большинство нейтронов, не попав ни в одно ядро, вылетают наружу. Для чистого урана-235 критическая масса составляет около 50 кг.

Упражнение 6.5

1. Что называется ядерной реакцией?
2. Какой принцип цепной ядерной реакции?
3. Кто и когда открыл деление ядер урана?
4. Что необходимо для осуществления цепной ядерной реакции?

6.6. ЯДЕРНЫЙ РЕАКТОР

Устройство, в котором поддерживается управляемая реакция деления ядер, называется *ядерным* (или *атомным*) *реактором*.

Первый ядерный реактор был построен в 1942 году в США под руководством Э. Ферми. Схема ядерного реактора на медленных нейтронах приведена на рис. 6.5.

Ядерная реакция протекает в активной зоне реактора, которая заполнена замедлителем и пронизана стержнями, содержащими обогащенную смесь изотопов урана с повышенным содержанием урана-235 (до 3%). В активную зону вводятся регулирующие стержни, содержащие кадмий или бор, которые интенсивно поглощают нейтроны. Введение стержней в активную зону позволяет управлять скоростью цепной реакции.

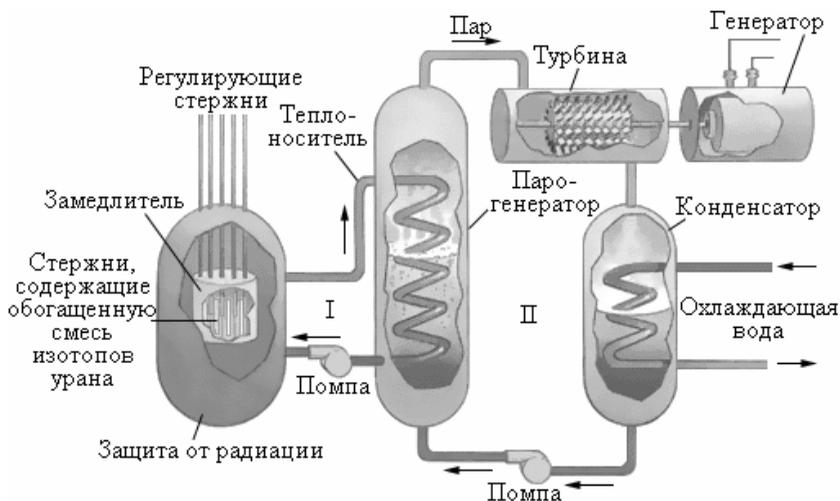


Рис. 6.5. Схема устройства ядерного реактора на медленных нейтронах

Активная зона охлаждается с помощью прокачиваемого теплоносителя, в качестве которого может применяться вода или металл с низкой температурой плавления (например, натрий, имеющий температуру плавления 98 °С). В парогенераторе теплоноситель передает тепловую энергию воде, превращая ее в пар высокого давления, который направляется в турбину, соединенную с элект-

трогенератором, а из турбины поступает в конденсатор. Во избежание утечки радиации контуры теплоносителя I и парогенератора II работают по замкнутым циклам.

Турбина атомной электростанции является тепловой машиной, определяющей в соответствии со вторым законом термодинамики общую эффективность станции.

При разработке ядерных реакторов большое внимание уделяется проблеме обеспечения радиационной безопасности людей и предотвращения случайных выбросов радиоактивных веществ, которые в большом количестве накапливаются в активной зоне реактора.

Возможны реакторы, работающие без замедлителя на быстрых нейтронах. Такие реакторы более компактны, чем реакторы на медленных нейтронах, что очень существенно при использовании реакторов в качестве источников энергии на судах или подводных лодках. Однако в реакторах на быстрых нейтронах не может быть использован в качестве горючего естественных уран, нужен уран, обогащенный изотопом ${}_{92}^{235}\text{U}$. Реакторы же на медленных нейтронах могут работать и на естественном уране.

Слова и словосочетания

ядерный реактор	медленные нейтроны
активная зона	замедлитель
обогащенная смесь	теплоноситель
радиационная безопасность	парогенератор

6.7. ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Второй путь освобождения ядерной энергии связан с реакциями синтеза. При слиянии легких ядер и образовании нового ядра выделяется большое количество энергии. Реакции слияния легких ядер носят название *термоядерных реакций*, так как они могут протекать только при очень высоких температурах. Чтобы два ядра вступили в реакцию синтеза, они должны сблизиться на расстояние действия ядерных сил порядка $2 \cdot 10^{-15}$ м, преодолев электрическое отталкивание их положительных зарядов. Для этого средняя кинетическая энергия теплового движения молекул должна превосходить потенциальную энергию кулоновского взаимодействия. При

этом вещество необходимо нагреть до температуры порядка 10^8 — 10^9 К. При такой температуре вещество находится в полностью ионизированном состоянии, которое называется *плазмой*.

Энергия, которая выделяется при термоядерных реакциях, в расчете на один нуклон в несколько раз превышает удельную энергию, выделяющуюся в цепных реакциях деления ядер. Так, при слиянии тяжелого водорода — дейтерия со сверхтяжелым изотопом водорода — тритием выделяется около 3,5 Мэв на один нуклон, в то время как при делении урана на один нуклон выделяется энергия, равная примерно 1 Мэв.

Осуществление *управляемых термоядерных реакций* даст человечеству новый экологически чистый и практически неисчерпаемый источник энергии. Однако получение сверхвысоких температур и удержание плазмы, нагретой до миллиарда градусов, представляет собой труднейшую научно-техническую задачу на пути осуществления управляемого термоядерного синтеза.

На данном этапе развития науки и техники удалось осуществить только *неуправляемую реакцию синтеза* в водородной бомбе. Высокая температура, необходимая для ядерного синтеза, достигается здесь с помощью взрыва обычной урановой или плутониевой бомбы.

Термоядерные реакции играют чрезвычайно важную роль в эволюции Вселенной. Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение.

Слова и словосочетания

реакция синтеза	слияние
термоядерная реакция	плазма

Упражнение 6.6

1. Какой процесс называется термоядерной реакцией?
2. Почему возможна термоядерная реакция?
3. Что необходимо для осуществления термоядерной реакции?
4. Почему в настоящее время невозможно осуществить управляемую термоядерную реакцию?

Навчальне видання

КОРЧУК Елена Юрьевна

ФИЗИКА

Электродинамика и квантовая физика

Учебное пособие

КОРЧУК Олена Юріївна

ФІЗИКА

Електродинаміка і квантова фізика

Навчальний посібник
(Російською мовою)