

ФИЗИКА

Учебное пособие для 10 класса
учреждений общего среднего образования
с русским языком обучения

*Допущено
Министерством образования
Республики Беларусь*

Минск
«Адукацыя і выхаванне»
2013

УДК 53(075.3=161.1)
ББК 22.3я721
Ф50

Авторы: Е. В. Громыко, В. И. Зенькович, А. А. Луцевич,
И. Э. Слесарь

Рецензенты: кафедра лазерной физики и спектроскопии учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» (доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой *С. С. Ануфрик*; кандидат педагогических наук, доцент *Н. В. Матецкий*); начальник центра развития регионального образования государственного учреждения образования «Витебский областной институт развития образования», методист высшей категории *И. А. Ситникова*; учитель физики высшей категории государственного учреждения образования «Средняя школа № 36 г. Минска» *Т. И. Журова*

Физика : учеб. пособие для 10-го кл. учреждений общ. сред. образования с
Ф50 рус. яз. обучения / Е. В. Громыко [и др.]. — Минск : Адукацыя і выхаванне, 2013. — 272 с. : ил.

ISBN 978-985-471-583-4.

УДК 53(075.3=161.1)
ББК 22.3я721

ISBN 978-985-471-583-4

© Оформление. РУП «Издательство
“Адукацыя і выхаванне”», 2013

КАК РАБОТАТЬ С УЧЕБНЫМ ПОСОБИЕМ

Перед вами учебное пособие «Физика» для 10 класса. В этом учебном году вы продолжите изучение тепловых и электромагнитных явлений в разделах «Молекулярная физика» и «Электродинамика». Чтобы работа с данным пособием принесла больше пользы, дадим несколько советов.

Сначала прочитайте параграф от начала до конца, а затем беритесь за его детальную проработку. Необходимо не только освоить его содержание, но и выучить определения физических понятий, физических величин, основные формулы, правила, законы и принципы.

Обратите внимание на используемые в тексте учебного пособия обозначения: Δ — приращение физической величины, т. е. разность между её конечным и начальным значениями; $-\Delta$ — убыль величины, т. е. разность между её начальным и конечным значениями; δ — элементарное значение величины (например, δA — элементарная работа).

Иллюстрации и описания опытов помогут вам гораздо лучше понять физические явления, о которых идёт речь в тексте учебного пособия. Информация, представленная в таблицах, носит справочный характер и понадобится вам при решении задач. В некоторых параграфах имеется дополнительный материал, напечатанный мелким шрифтом. Его можно изучать по желанию.

Каждая глава и параграф начинаются с краткого введения. Основные понятия и формулы выделены в тексте. В конце каждого параграфа сформулированы главные выводы, приведены контрольные вопросы и упражнения. Постарайтесь ответить на каждый вопрос и выполнить все задания, чтобы лучше усвоить изученный материал. Задачи в упражнениях расположены по возрастанию степени сложности.

В учебном пособии вы встретите следующие условные обозначения:

-  — главные выводы;
-  — контрольные вопросы;
-  — материал для любознательных;
-  — наиболее сложные вопросы и задания.

Желаем творческих успехов и хороших отметок!

Авторы



Молекулярная физика — раздел физики, изучающий свойства тел и происходящие в них процессы, связанные с огромным числом частиц (молекул, атомов, ионов), содержащихся в телах. На основе законов молекулярной физики конструируют тепловые двигатели, установки для сжижения газов, холодильные аппараты и другие технические устройства, создают новые материалы (различные сплавы, керамики, пластмассы, сорта резины, стекла, бетона, всевозможные полупроводниковые материалы и др.) с заданными физическими (механическими, электрическими, магнитными, оптическими) свойствами. Новейшие открытия в молекулярной физике оказывают влияние на развитие химии и биологии. Например, возникшая на стыке наук молекулярная биология объясняет явления, происходящие в живых организмах.

В 9 классе при изучении механики вы рассматривали механическую форму движения материи, т. е. перемещение тел друг относительно друга и их взаимодействие. При этом внутреннее строение того или иного тела не имело значения. Напомним, что *физическим телом* называют материальный объект, имеющий массу и занимающий некоторый объём пространства. То, из чего состоит физическое тело, называют *веществом*. Вещество — один из видов *материи*, другим является *поле*. Материя — это всё, что существует объективно, т. е. независимо от человеческого сознания. Материя существует в движении. В физике изучают физические формы движения материи — механическую, тепловую, электромагнитную и др.

В молекулярной физике рассматривают явления, происходящие с макроскопическими телами и обусловленные тепловой формой движения материи. *Макроскопическими телами (системами)* в физике называют тела (системы), состоящие из огромного числа частиц. Капля воды, газ в воздушном шаре, деревянная доска, серебряная ложка, наша планета (рис. 1) — всё это макроскопические тела.

Для описания тепловых явлений, происходящих с макроскопическими телами (системами), необходимы подходы и методы, отличные от тех, которые применяют в механике. Движение одной молекулы, происходящее в простран-

стве, может быть описано с использованием законов динамики одним векторным или тремя скалярными уравнениями. Однако применить законы Ньютона ко всем молекулам, число которых в любом макроскопическом теле огромно, нереально. Пользуясь законами динамики для нахождения характеристик макроскопического тела, например, воздуха в объёме 1 см^3 , понадобилось бы решить приблизительно $8 \cdot 10^{19}$ уравнений движения частиц. Макросистема — это качественно новая система, подчиняющаяся статистическим закономерностям. Главной особенностью этих закономерностей является то, что для их определения используют средние значения параметров системы и отдельных её частиц.

Для описания макроскопической системы, например газа в сосуде, может быть использовано два метода — молекулярно-кинетический (статистический) и термодинамический. Молекулярно-кинетический метод исходит из определённых гипотез о внутреннем строении вещества, а термодинамический — рассматривает макроскопическую систему в целом, не интересуясь внутренним строением входящих в неё тел. При *молекулярно-кинетическом описании* используют средние значения физических величин, которые характеризуют поведение частиц, составляющих систему. Например, среднюю кинетическую энергию и среднюю скорость хаотического движения частиц. При *термодинамическом описании* используют физические величины, которые характеризуют систему в целом. Так, описать состояние определённой массы газа в сосуде можно, используя три параметра — давление, объём и температуру.

В *молекулярно-кинетической теории* изучают свойства тел в зависимости от их строения, от сил взаимодействия между частицами (молекулами, атомами, ионами), из которых состоят тела, и от характера движения этих частиц. *Термодинамика* изучает способы и формы передачи энергии от одного тела к другому, закономерности превращения одних видов энергии в другие. Следовательно, статистический и термодинамический методы дополняют друг друга.



Рис. 1

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

Что представляет собой внутреннее строение любого вещества? Сплошное оно или имеет дискретную структуру? Почему свойства различных веществ отличаются друг от друга? От чего зависят те или иные свойства вещества?

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три положения:

1. **Вещество имеет дискретное строение, т. е. состоит из микроскопических частиц.**
2. **Частицы вещества хаотически движутся.**
3. **Частицы вещества взаимодействуют между собой.**

Дискретное строение вещества. Согласно первому положению молекулярно-кинетической теории вещество имеет дискретное строение, т. е. состоит из отдельных частиц (молекул, атомов, ионов). При изучении физики в 6 и 8 классах вы узнали, что реальное существование молекул подтверждают экспериментальные факты. Такими фактами, в частности, являются растворение веществ в воде и в других растворителях, сжатие и расширение любых тел и особенно газов, механическое дробление вещества, диффузия, броуновское движение и многое другое.



Рис. 2

Глаз может различить две точки, если расстояние между ними не менее 0,1 мм. Современные оптические микроскопы позволяют различать структуры с расстоянием между элементами порядка двухсот нанометров и более (≥ 200 нм), что обеспечивает возможность наблюдать и фотографировать очень большие молекулы, состоящие из сотен и даже тысяч атомов (молекулы некоторых витаминов, гормонов и белков). На рисунке 2 приведена

фотография молекулы нуклеиновой кислоты нитевидной формы, общая длина которой 34 мкм.

Переход от световых волн в оптических микроскопах к ускоренным пучкам электронов, управляемым электрическими и магнитными полями, в электронных микроскопах улучшил пределы разрешения до десятых долей нанометра. Использование электронных микроскопов позволило наблюдать и фотографировать атомарные структуры.



4 марта 1981 г. немецкий учёный Герд Бинниг и швейцарский учёный Генрих Рорер впервые в мире наблюдали отдельные атомы на поверхности кремния (рис. 3). На рисунке 4, а, б изображены электронный и туннельный микроскопы. За создание первого электронного микроскопа немецкому учёному Эрнсту Руске и за изобретение сканирующего туннельного микроскопа Г. Биннигу и Г. Рореру была присуждена Нобелевская премия по физике за 1986 год.

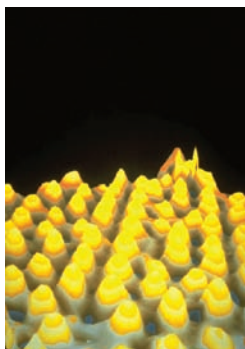


Рис. 3

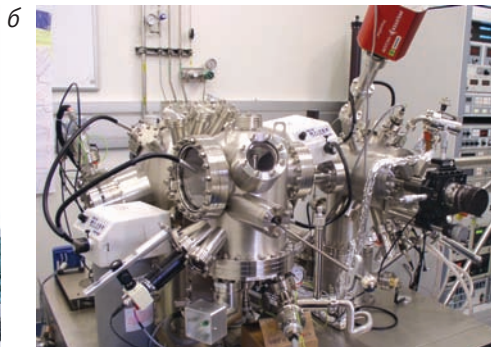


Рис. 4

Тепловое движение частиц вещества. Согласно второму положению молекулярно-кинетической теории частицы, составляющие вещество, находятся в непрерывном хаотическом движении, которое называют *тепловым*.

Наиболее ярким экспериментальным подтверждением теплового движения частиц вещества (молекул, атомов и ионов) является *броуновское движение*, т. е. движение «взвешенных» в жидкости или газе мельчайших нерастворимых твёрдых частиц размерами примерно 1 мкм и меньше. «Взвешенные» частицы — это частицы, плотность вещества которых близка к плотности окружающей их среды (жидкости или газа). Они распределяются по всему объёму среды, не оседая на дно сосуда и не поднимаясь на её поверхность (рис. 5).

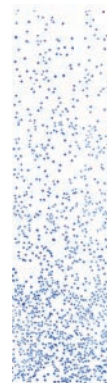


Рис. 5

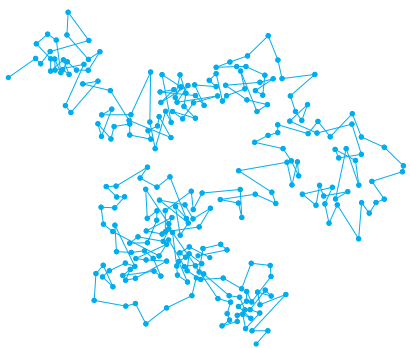


Рис. 6

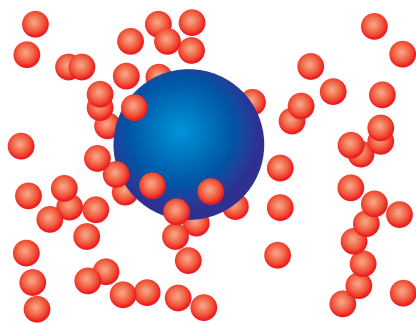


Рис. 7

Первым обратил внимание на указанное явление в 1827 г. английский ботаник Роберт Броун (1773—1858). Броуновские частицы движутся непрерывно и хаотично, а траектории их движений очень сложны. На рисунке 6 изображена упрощённая траектория движения броуновской частицы. Точками отмечены положения частицы через одинаковые промежутки времени. Траектория движения в течение каждого промежутка времени заменена отрезком прямой, который представляет собой модуль результирующего перемещения частицы.

Броуновское движение обусловлено свойствами жидкости или газа, не зависит от природы вещества броуновской частицы и внешних воздействий (кроме температуры). Причиной броуновского движения является тепловое движение частиц среды, окружающей броуновскую частицу, и отсутствие точной компенсации ударов, испытываемых частицей со стороны окружающих её молекул (атомов или ионов) (рис. 7). Чем меньше размеры и масса броуновской частицы,

тем заметнее становятся изменения её импульса под воздействием ударов. Интенсивность движения броуновских частиц растёт с повышением температуры и уменьшением вязкости среды, т. е. внутреннего трения, оказываемого ею. Броуновское движение едва удаётся подметить в глицерине, а в газах оно, напротив, чрезвычайно интенсивно.

Первую количественную теорию броуновского движения предложил в 1905 г. Альберт Эйнштейн (1879—1955). Польский физик Мариан Смолуховский (1872—1917) в 1906 г. также разработал количественную теорию броуновского движения. Экспериментальное подтверждение предложенной теории явилось заслугой французского физика Жана Перрена (1870—1942). «За доказательство существования молекул» Ж. Перрену присуждена Нобелевская премия по физике за 1926 г. Броуновское движение свидетельствует, что молекулы действительно существуют и что они непрерывно и хаотически движутся.

Подтверждением теплового движения частиц вещества является также *диффузия* — процесс выравнивания концентраций неоднородно распределённых в пространстве атомов, молекул или ионов вещества. Концентрация — величина, равная отношению числа частиц N к занимаемому ими

объёму V : $n = \frac{N}{V}$.



Если в разных частях одного и того же тела в объёмах V_i и V_j концентрации

$n_i = \frac{N_i}{V_i}$ и $n_j = \frac{N_j}{V_j}$ частиц не совпадают, то вследствие их теплового движения происходит упорядоченное перемещение, приводящее к выравниванию концентраций при постоянной температуре и отсутствии внешних сил. Если температура не постоянна или на систему действуют внешние силы, то в результате диффузии устанавливается пространственно неоднородное равновесное распределение концентраций частиц.

Скорость диффузии зависит от характера движения частиц вещества, который определяется температурой и особенно агрегатным состоянием. В газах диффузия происходит быстрее, чем в жидкостях, а тем более в твёрдых телах. Диффузия играет важную роль в природе и технике. Благодаря диффузии осуществляется питание растений необходимыми веществами из почвы, в живых организмах происходит всасывание питательных веществ через стенки сосудов пищеварительного тракта. Для увеличения твёрдости стальных деталей их поверхностный слой подвергают диффузному насыщению углеродом. Диффузия используется в ядерных технологиях как один из способов обогащения урана.

Взаимодействие частиц вещества. Сам факт существования твёрдых и жидких тел свидетельствует, что между частицами веществ, образующих эти тела, действуют *силы взаимного притяжения*. Частицы (атомы или молекулы) в этих телах удерживаются вместе именно силами взаимного притяжения. Из повседневного опыта известно, что эти силы нагляднее всего проявляются в твёрдых телах. Тонкий стальной трос диаметром 2 мм достаточно прочен, чтобы удержать на весу гирию массой 100 кг. То, что газы занимают весь предоставленный им объём, указывает на весьма незначительное проявление сил взаимного притяжения между их молекулами*. Усреднённое расстояние между молекулами газов существенно превышает размеры самих молекул,

* Несмотря на то что не все газы и жидкости состоят из молекул (они могут состоять и из атомов, и из ионов), в дальнейшем, говоря о газах и жидкостях, мы будем использовать термин «молекула».

а также расстояния между частицами, из которых состоят жидкости и твёрдые тела. Такое различие в проявлении сил взаимного притяжения между частицами твёрдых тел и жидкостей, с одной стороны, и частицами газов — с другой возможно в том случае, когда модуль сил взаимного притяжения между частицами быстро убывает с возрастанием расстояния между их центрами. При этом кинетическая энергия E_k теплового движения молекул газов намного превышает модуль потенциальной энергии $|E_n|$ их взаимодействия: $E_k \gg |E_n|$.

Относительно малая сжимаемость жидкостей и твёрдых тел указывает на то, что между молекулами вещества существуют и силы взаимного отталкивания. Силы притяжения и силы отталкивания действуют одновременно. В противном случае устойчивых состояний больших совокупностей молекул не могло бы существовать: составляющие их частицы стягивались бы в одном месте или разлетались в разные стороны. Зависимость модулей сил взаимного притяжения и взаимного отталкивания от расстояния между центрами частиц должна быть различной. Кроме того, должно существовать некоторое расстоя-

ние r_0 между центрами частиц, при котором силы притяжения уравновешиваются силами отталкивания — их равнодействующая равна нулю (рис. 8, а). Расстояние r_0 называют *равновесным*.

Рассмотрим взаимодействие электрически нейтральных частиц — атомов и молекул. В 8 классе вы узнали, что перераспределение заряда в теле, вызываемое воздействием другого заряженного тела, называют электризацией через влияние. Если расстояние между центрами молекул превышает их размеры (рис. 8, б), то происходит своеобразная «электризация» этих молекул через влияние. Чтобы уяснить, почему это происходит, надо учесть следующее. Во-первых, протоны и электроны, имеющие заряды противоположных знаков, внутри частицы не находятся

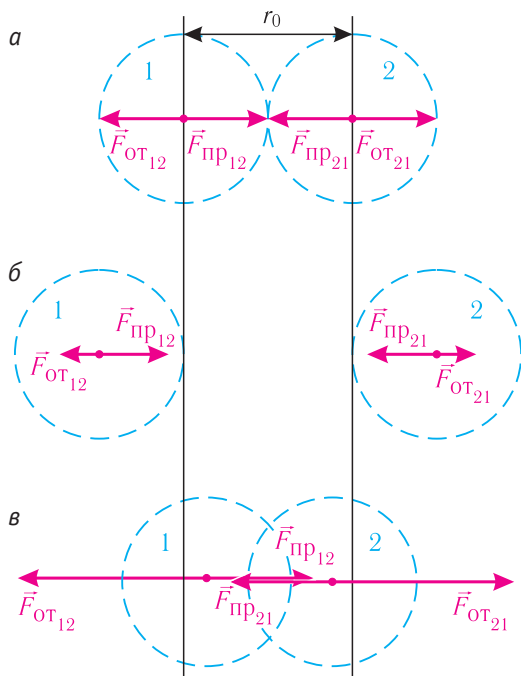


Рис. 8

в одной точке, поэтому вблизи всякого атома или молекулы существует электрическое поле. Во-вторых, под воздействием этого поля положение и движение заряженных частиц внутри соседних молекул слегка изменяется таким образом, что ядра, содержащие протоны, смещаются в направлении внешнего электрического поля, а электроны — в противоположную сторону. Это явление получило название электрической поляризации. Электрическое поле, созданное поляризационными зарядами молекулы 2, в свою очередь, вызывает перераспределение ядер, содержащих протоны, и электронов в молекуле 1. В результате молекулы будут обращены друг к другу противоположно заряженными частями, что и обеспечивает их взаимное притяжение.

Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям на близких расстояниях, когда электронные оболочки взаимодействующих молекул перекрываются (рис. 8, в), силы молекулярного отталкивания преобладают над силами притяжения. Модуль сил отталкивания очень велик при малых расстояниях между центрами взаимодействующих молекул, но быстро убывает с увеличением расстояния. Взаимному перекрытию электронных оболочек препятствует взаимное отталкивание электронов.

! Модуль сил межмолекулярного взаимодействия обратно пропорционален n -й степени расстояния между центрами молекул $F \sim \frac{1}{r^n}$, где для сил притяжения $n=7$, а для сил отталкивания $n=13$.

Зависимость проекции равнодействующей F_r сил притяжения и отталкивания двух соседних молекул от расстояния r между их центрами можно изобразить графически. Направим ось Or от молекулы 1, центр которой совпадает с началом координат, к находящемуся от него на изменяющемся расстоянии r центру молекулы 2 (рис. 9). Будем считать молекулу 1 условно неподвижной, а молекулу 2 изменяющей своё положение относительно молекулы 1.

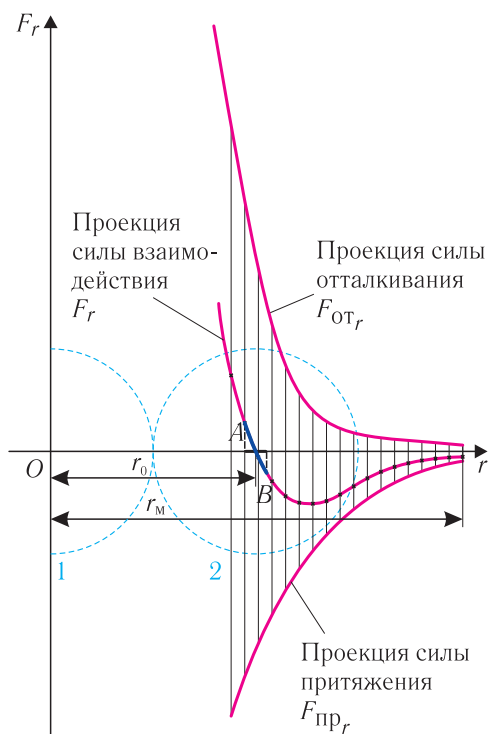


Рис. 9

Тогда проекция силы отталкивания молекулы 2 от молекулы 1 на ось Or будет положительной, а проекция силы притяжения молекулы 2 к молекуле 1 — отрицательной.

На малых расстояниях ($r < r_0$) модуль силы отталкивания (см. рис. 9) больше модуля силы притяжения, но с увеличением расстояния r он убывает быстрее, чем модуль силы притяжения. Начиная с некоторого расстояния r_m взаимодействием молекул можно пренебречь. Наибольшее расстояние r_m , на котором ещё учитывают взаимодействие молекул, называют *радиусом молекулярного действия*. Расстояние r_0 соответствует устойчивому (равновесному) взаимному положению молекул. Тонкие «вертикальные» (параллельные F_r) линии проведены при выполнении сложения проекций сил.

График зависимости проекции равнодействующей F_r сил притяжения и отталкивания двух соседних молекул от расстояния r между их центрами (кривая проекции силы взаимодействия F_r на рисунке 9) позволяет объяснить молекулярный механизм возникновения сил упругости в твёрдых телах. При действии на тело растягивающих внешних сил расстояние r между центрами частиц вещества становится больше равновесного расстояния r_0 . Модуль силы притяжения на расстояниях $r > r_0$ превышает модуль силы отталкивания (см. рис. 9). Действие сил притяжения между частицами возвращает их в первоначальные положения после прекращения внешнего воздействия. При сжатии твёрдого тела его частицы сближаются на расстояния $r < r_0$. Теперь силы отталкивания становятся преобладающими и препятствуют дальнейшему сжатию. При малых смещениях частиц из первоначальных положений устойчивого равновесия, вызванных деформацией твёрдого тела, зависимость проекции результирующей силы F_r от расстояния r практически линейна (участок AB кривой F_r графика на рисунке 9 можно считать отрезком прямой).



1. В основе молекулярно-кинетической теории лежат три положения:
 - 1) Вещество имеет дискретное строение, т. е. состоит из микроскопических частиц.
 - 2) Частицы вещества хаотически движутся.
 - 3) Частицы вещества взаимодействуют между собой.
2. Силы взаимодействия между частицами вещества имеют электромагнитную природу и очень быстро убывают с увеличением расстояния между частицами.



1. Перечислите основные положения молекулярно-кинетической теории. Какие научные факты и эксперименты их подтверждают?
2. Почему броуновское движение заметно лишь у частиц с малыми размерами и массой?
3. Какова природа сил межмолекулярного взаимодействия?
4. Какие силы (притяжения или отталкивания) будут преобладать, если под действием внешних сил расстояние между частицами вещества станет: а) меньше равновесного, б) больше равновесного? Что произойдёт в каждом из этих случаев после прекращения действия внешних сил?
5. Если смешать два равных объёма воды и спирта, то общий объём жидкостей будет меньше суммы объёмов воды и спирта. Если в сосуд, в который налит некоторый объём воды, добавить такой же объём ртути, то общий объём жидкостей будет равен сумме объёмов воды и ртути. Как можно объяснить разницу?
6. Почему хорошо притёртую стеклянную пробку трудно вынуть из горлышка стеклянного флакона?

§ 2. Масса и размеры молекул. Количество вещества

1,0 см³ любого газа, находящегося при нормальных условиях (температура $t_0 = 0,0$ °С, давление $p_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па), содержит $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Насколько велико это число, показывает следующий пример. Предположим, что из отверстия в ампуле вместимостью $V = 1,0$ см³ каждую секунду вылетает сто молекул. Тогда для того, чтобы все молекулы вылетели из ампулы, потребуется 8,6 миллиардов лет, т. е. промежуток времени, сравнимый с возрастом Вселенной (12—15 млрд лет). Такое огромное число молекул в веществе свидетельствует о том, что их размеры очень малы. Каковы же размеры и масса частиц вещества? Как их можно определить?

Молекулярно-кинетическая теория дала возможность оценить массу и размеры частиц, образующих макроскопические тела. Молекулы, как и атомы, не имеют чётких границ. Если представить молекулу в виде шарика, то её радиус имеет значение от 0,1 нм у простейших до 100 нм у сложных молекул, состоящих из нескольких тысяч атомов. Например, оценочный диаметр молекулы водорода составляет 0,2 нм, а молекулы воды — 0,3 нм. При таких размерах число частиц в веществе очень велико. Например, в одном грамме воды содержится $3,3 \cdot 10^{22}$ молекул.

Размеры и масса молекулы возрастают с увеличением числа атомов, которые входят в её состав. Атомы и молекулы (кроме многоатомных молекул органических веществ) имеют массу порядка 10^{-26} кг. Из-за малых значений выражать массы атомов и молекул в килограммах (кг) неудобно. Поэтому для измерения масс молекул в химии и физике используют атомную единицу массы (а. е. м.). Атомную единицу массы выражают через массу изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$:

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{1}{12} m_{0\text{C}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Массу молекулы (атома), выраженную в атомных единицах массы, называют относительной молекулярной (атомной) массой и обозначают символом M_r . Относительная молекулярная (атомная) масса M_r показывает, во сколько раз масса молекулы (атома) больше атомной единицы массы:

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0\text{C}}}.$$

Количество вещества ν определяют отношением числа частиц этого вещества N к постоянной Авогадро N_A :

$$\nu = \frac{N}{N_A}.$$

Основной единицей количества вещества в СИ является моль (моль). *1 моль* равен количеству вещества, содержащему столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$. В одном моле любого вещества находится одинаковое число атомов или молекул, которое в честь итальянского учёного Амедео Авогадро (1776—1856) получило название *постоянная Авогадро* (N_A). Эта величина является одной из фундаментальных физических постоянных, её значение

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

В молекулярно-кинетической теории наряду с относительной молекулярной (атомной) массой M_r используют молярную массу M .

Молярная масса — масса вещества, взятого в количестве $\nu = 1$ моль. Молярную массу M определяют отношением массы m вещества к его количеству ν :

$$M = \frac{m}{\nu}.$$

Основной единицей молярной массы в СИ является килограмм на моль $\left(\frac{\text{кг}}{\text{моль}}\right)$. Молярная масса вещества связана с его относительной молекулярной (атомной) массой следующим соотношением:

$$M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

При решении задач относительную атомную массу определяют, пользуясь периодической системой химических элементов. В большинстве случаев значение относительной атомной массы округляют до целого числа. Так, например, относительная атомная масса водорода равна 1, кислорода — 16, азота — 14.

Молярную массу M вещества можно вычислить, умножив массу одной молекулы m_0 на число молекул в одном моле (постоянная Авогадро N_A):

$$M = m_0 N_A.$$

С учётом того, что $m_0 = \frac{M}{N_A}$, получим формулу для расчёта числа N молекул в данном веществе:

$$N = \frac{m}{m_0} = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A,$$

где m — масса вещества, ν — количество вещества (число молей). Используя данную формулу, можно рассчитать число молекул в одном грамме воды. Сделайте это самостоятельно и убедитесь в справедливости приведённого в начале параграфа значения.



1. Один моль — количество вещества, в котором содержится столько же частиц (атомов, молекул или ионов), сколько атомов находится в 0,012 кг изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$.

2. Постоянная Авогадро — фундаментальная физическая постоянная, равная числу частиц в одном моле любого вещества: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

3. Количество вещества (число молей) определяют отношением числа частиц этого вещества к постоянной Авогадро: $\nu = \frac{N}{N_A}$.

4. Молярную массу определяют отношением массы вещества к количеству вещества: $M = \frac{m}{\nu}$.

5. Массу молекулы вещества можно вычислить по формуле $m_0 = \frac{M}{N_A}$.

?

1. В каких единицах измеряют массы атомов и молекул?
2. Что такое количество вещества? В каких единицах измеряют эту физическую величину?
3. Что показывает постоянная Авогадро?
4. Что называют молярной массой вещества?
5. Как, зная относительную молекулярную (атомную) массу вещества, определить его молярную массу?

Примеры решения задач

Пример 1. Определите молярную массу и массу одной молекулы сульфата меди(II) CuSO_4 .

Решение. Чтобы вычислить молярную массу M любого вещества, необходимо по химической формуле найти относительную молекулярную массу M_r этого вещества и полученное значение умножить на $10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. Поскольку химическая формула сульфата меди(II) имеет вид CuSO_4 , то $M_r = 64 + 32 + 16 \cdot 4 = 1,6 \cdot 10^2$.

Тогда молярная масса $M = 1,6 \cdot 10^2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

Для определения массы молекулы CuSO_4 воспользуемся формулой

$$m_0 = \frac{M}{N_A}^*:$$

$$m_0 = \frac{0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 0,027 \cdot 10^{-23} \text{ кг} = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}.$$

О т в е т: $M = 0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$, $m_0 = 2,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$.

* При решении задач постоянную Авогадро можно принять $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Пример 2. Определите количество вещества, содержащегося в железном бруске, объём которого $V = 100 \text{ см}^3$. Чему равно число атомов железа в бруске?

Плотность железа $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дано:

$$V = 100 \text{ см}^3 = 1,00 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

ν — ?

N — ?

Решение. Количество вещества можно

определить по формуле $\nu = \frac{m}{M}$, где m — масса

железного бруска, а $M = 56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ —

молярная масса железа. Поскольку $m = \rho V$,

$$\text{то } \nu = \frac{\rho V}{M}.$$

$$\nu = \frac{7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 1,00 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3}{56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 14 \text{ моль}.$$

Число атомов в железном бруске $N = \nu N_A$.

$$N = 14 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 8,4 \cdot 10^{24}.$$

Ответ: $\nu = 14 \text{ моль}$, $N = 8,4 \cdot 10^{24}$.

Упражнение 1

1. Пользуясь периодической системой химических элементов, определите молярные массы воды H_2O , углекислого газа CO_2 , аммиака NH_3 , азотной кислоты HNO_3 . Определите массы молекул этих веществ.

2. В стакан налита вода H_2O массой $m = 0,20 \text{ кг}$. Определите количество вещества и число молекул воды в стакане.

3. Определите массу $N = 4,5 \cdot 10^{22}$ молекул сероводорода H_2S .

4. Сравните число частиц вещества в алюминиевом и медном кубиках одинакового объёма. Плотность алюминия $\rho_a = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, плотность меди

$$\rho_m = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

5. В серебряной пластинке $N = 1,0 \cdot 10^{24}$ атомов. Определите объём пластинки, если плотность серебра $\rho = 1,05 \cdot 10^4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6*. Английский физик Джон Уильям Стретт, лорд Рэлей (1842—1919) предложил такой способ оценки размеров молекул: на поверхность воды в широком сосуде он капнул каплю оливкового масла объемом $V = 8,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$ и

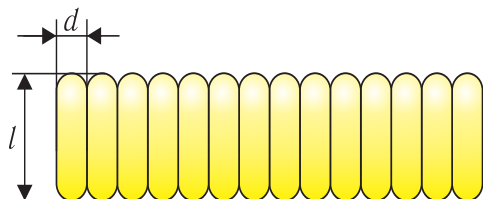


Рис. 10

плотностью $\rho = 9,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Капля растеклась, образовав плёнку площадью $S = 0,55 \text{ м}^2$. Определите по этим данным массу и размеры молекулы оливкового масла, приняв толщину плёнки равной длине цилиндрических

по форме молекул масла (рис. 10). Молярную массу оливкового масла примите $M = 0,28 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

7. Вода в открытом сосуде испарилась за промежуток времени $t = 6,0$ суток. Определите массу воды, находившейся в сосуде, если с её поверхности ежесекундно вылетало $\langle N_1 \rangle = 5,0 \cdot 10^{18}$ молекул.

8*. В сосуд с водой бросили кристаллик поваренной соли NaCl массой $m = 2,0$ мг. Спустя некоторый промежуток времени соль, растворившись, равномерно распределилась по всему объёму воды так, что в каждом кубическом миллиметре раствора оказалось $N_1 = 6,0 \cdot 10^{12}$ ионов натрия. Определите объём воды в сосуде.

9*. Капелька духов, содержащая ароматическое вещество массой $m = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ г}$, испарилась в комнате вместимостью $V_1 = 40 \text{ м}^3$. Молярная масса ароматического вещества $M = 50 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$. Определите среднее число молекул этого вещества, попадающих при каждом вдохе в лёгкие человека, если объём вдыхаемого воздуха $V_2 = 2,2 \text{ л}$.

§ 3. Макро- и микропараметры. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

Наиболее простым из всех агрегатных состояний вещества является газообразное. Поэтому изучение свойств веществ начинают с газов. Газ (греч. chaos — хаос) — такое агрегатное состояние вещества,

когда составляющие его частицы почти свободно и хаотически движутся между соударениями, во время которых происходит резкое изменение их скорости. Термин «газ» предложил в начале XVII в. нидерландский химик Ян Батист ван Гельмонт (1579—1644). Из физики 7 класса вы знаете, что давление газа на стенки сосуда, в котором он находится, как и на любое тело, помещённое внутрь сосуда, создаётся в результате ударов частиц, образующих газ (рис. 11). Вследствие хаотичности их движения усреднённое по времени давление газа во всех точках сосуда одинаково. В общем случае давление — физическая скалярная величина, равная отношению модуля силы давления, действующей на плоскую

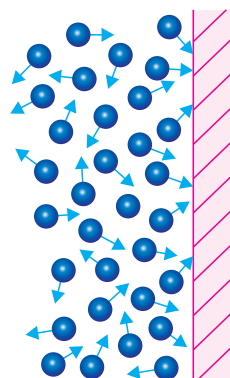


Рис. 11

поверхность, к площади этой поверхности: $p = \frac{F_{\text{д}}}{S}$. В СИ основной единицей давления является паскаль (Па).

Макро- и микропараметры. В 9 классе при изучении механики вы познакомились с понятием «состояние механической системы тел» и параметрами этого состояния — координатами, скоростями и импульсами. В тепловых процессах основными физическими величинами, характеризующими некоторое количество газа как макроскопическую систему, являются давление p , объём V и температура T . Эти физические величины называют *макроскопическими параметрами* состояния газа. К *микроскопическим параметрам* состояния газа относят индивидуальные характеристики молекул: массу отдельной молекулы m_0 , а также скорость $\vec{v}$, импульс $\vec{p}$ и кинетическую энергию E_k её теплового движения. Заметим, что речь идёт о средних значениях как макро-, так и микроскопических параметров.

Одна из важнейших задач молекулярно-кинетической теории состоит в установлении связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами.

Идеальный газ. Для теоретического объяснения свойств газов используют их упрощённую модель. Идеальный газ — модель газа, удовлетворяющая следующим условиям: 1) молекулы газа можно считать материальными точками, которые хаотически движутся; 2) силы взаимодействия между молекулами идеального газа практически отсутствуют (потенциальная энергия взаимодействия равна нулю); они действуют только при столкновениях молекул, причём это силы отталкивания. Поведение молекул идеального газа можно описать,

пользуясь законами Ньютона. Между соударениями молекулы движутся практически равномерно и прямолинейно.

Для реальных газов модель идеального газа можно использовать в ограниченном как снизу, так и сверху диапазоне температур и при достаточно малых давлениях. Так, например, свойства водорода и гелия при нормальном атмосферном давлении и комнатной температуре близки к свойствам идеального газа.

Конечно, ни одна модель, в том числе и модель идеального газа, не в состоянии описать все свойства системы. Однако использование модели идеального газа существенно упрощает задачу нахождения количественных соотношений между макроскопическими и микроскопическими параметрами газа.

Давление газа в молекулярно-кинетической теории. С точки зрения молекулярно-кинетической теории давление газа возникает в результате ударов молекул, образующих газ, по телу, соприкасающемуся с ним. При ударе импульс молекулы газа изменяется: $\Delta \vec{p} = m_0 \vec{v} - m_0 \vec{v}_0$, где m_0 — её масса, а $\vec{v}_0$ и $\vec{v}$ — скорости до и после удара. Если Δt — промежуток времени между двумя последовательными ударами о тело одной и той же молекулы, то средней силе $\langle \vec{F}_m \rangle$, с которой тело действует на молекулу во время удара продолжительностью δt , соответствует средняя сила $\langle \vec{F}_{\text{лст}} \rangle$, с которой одна молекула действует на тело (например, стенку сосуда) на протяжении промежутка времени Δt . Используя второй закон Ньютона для описания удара молекулы $\langle \vec{F}_m \rangle \delta t = m_0 \vec{v} - m_0 \vec{v}_0$ и третий закон Ньютона для мгновенных значений сил взаимодействия молекулы и тела $\vec{F}_m = -\vec{F}_{\text{лст}}$, получим:

$$\langle \vec{F}_m \rangle \delta t = m_0 \vec{v} - m_0 \vec{v}_0 = -\langle \vec{F}_{\text{лст}} \rangle \Delta t. \quad (3.1)$$

При нормальных условиях и макроскопических размерах сосуда число ударов молекул газа о плоскую поверхность площадью 1 см^2 составляет порядка 10^{24} в секунду. Очень слабые силы ударов отдельных молекул $\langle \vec{F}_{\text{лст}} \rangle$ складываются для громадного количества молекул в значительную по величине и почти постоянную силу, действующую на тело. Усреднённое по времени значение этой силы, отнесенное к единичной площадке, и есть давление газа.

Пусть в сосуде, имеющем форму куба с ребром длиной l (рис. 12), находится идеальный газ, состоящий из одинаковых молекул массой m_0 каждая. Будем считать, что молекулы упруго ударяются только о стенки сосуда, не сталкиваясь друг с другом. Так как молекулы, образующие стенки сосуда, совершают тепловые колебания, то скорости движения молекул газа при соуда-

рениях с ними изменяются случайным образом. Однако если газ и сосуд находятся в тепловом равновесии, то средняя кинетическая энергия молекул не изменяется со временем. Это позволяет реальное хаотическое движение молекул газа со всевозможными направлениями и модулями скоростей упрощённо рассматривать как движение, при котором модули проекций скорости на каждую из координатных осей одинаковые, т. е. $|v_x| = |v_y| = |v_z|$, и остаются неизменными, а при соударениях изменяется знак только у одной из трёх проекций скорости на координатные оси.

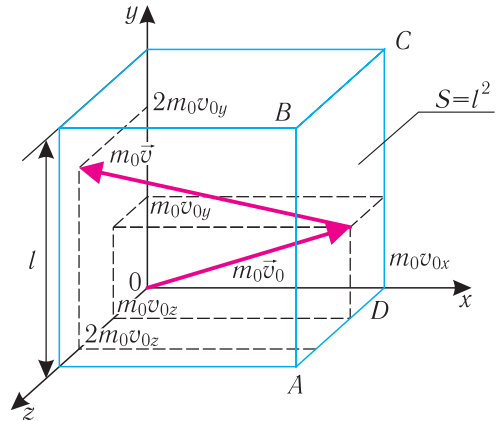


Рис. 12

Для описания удара молекулы газа о стенку $ABCD$ (см. рис. 12) запишем соотношение (3.1) в проекциях на координатные оси:

$$\begin{aligned}\langle F_{mx} \rangle \delta t &= \Delta p_x = m_0 v_x - m_0 v_{0x} = m_0 v_x - (-m_0 v_x) = 2m_0 v_x = -2m_0 v_{0x} = -\langle F_{1ctx} \rangle \Delta t; \\ \langle F_{my} \rangle \delta t &= \Delta p_y = m_0 v_y - m_0 v_{0y} = 0; \quad \langle F_{mz} \rangle \delta t = \Delta p_z = m_0 v_z - m_0 v_{0z} = 0.\end{aligned}$$

Так как промежуток времени между двумя последовательными соударениями молекулы со стенкой $ABCD$ $\Delta t = \frac{2l}{v_{0x}}$, то

$$\langle F_{1ctx} \rangle = -\frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_{0x}}{\Delta t} = \frac{2m_0 v_{0x}^2}{2l} = \frac{m_0 v_{0x}^2}{l}.$$

Проекция полной средней силы, с которой все N молекул, находящиеся в сосуде, действуют на стенку $ABCD$ $\langle F_{ctx} \rangle = \langle F_{1ctx} \rangle \cdot N$, так как $\langle F_{1cty} \rangle = 0$ и $\langle F_{1ctz} \rangle = 0$.

Следовательно, $\langle F_{ctx} \rangle = N \frac{m_0 \langle v_x^2 \rangle}{l}$, где $\langle v_x^2 \rangle$ — усреднённый по всем N частицам квадрат проекций их скоростей на ось Ox .

Разделив обе части соотношения для $\langle F_{ctx} \rangle$ на площадь стенки $S = l^2$, получим формулу для давления, оказываемого молекулами газа на стенку $ABCD$:

$$p = \frac{Nm_0 \langle v_x^2 \rangle}{l^3}.$$

Так как $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$, то $\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle$. Поскольку молекулы газа совершенно одинаково отражаются от трёх пар противоположно расположенных граней куба, то $\langle v_x^2 \rangle = \langle v_y^2 \rangle = \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{3} \langle v^2 \rangle$. С учётом того, что занимаемый газом объём $V = l^3$, а концентрация молекул газа $n = \frac{N}{V}$, получим:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle. \quad (3.2)$$

Уравнение (3.2) называют *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*. Это уравнение позволяет рассчитать макроскопический параметр давление p газа через концентрацию n молекул, массу m_0 молекулы и среднюю квадратичную скорость её теплового движения, определяемую по формуле $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$. Иначе говоря, формула (3.2) связывает между собой макро- и микроскопические параметры системы «идеальный газ».

Зависимость давления газа от среднего квадрата скорости движения его молекул объясняется тем, что с увеличением скорости, во-первых, возрастает импульс молекулы, а следовательно, и сила удара о стенку. Во-вторых, возрастает число ударов, так как молекулы чаще соударяются со стенками.

Обозначим через $\langle E_{\text{к}} \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$ *среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул*. Тогда основное уравнение молекулярно-кинетической теории примет следующий вид:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{к}} \rangle. \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) видно, что давление идеального газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения его молекул и их концентрации.



Проиллюстрировать зависимость давления от скорости движения молекул газа можно, используя механическую модель. Соберём установку, изображённую на рисунке 13. Закрепим пластину Π таким образом, чтобы она могла поворачиваться вокруг горизонтальной оси. Насыпем в воронку с узким горлышком мелкую дробь. Используя

наклонный жёлоб, направим на пластину струйку дроби (дробинки играют роль молекул). В результате многочисленных ударов дробинок пластина отклонится на некоторый угол под действием силы давления дробинок. Увеличив высоту, с которой скатываются дробинки, а следовательно, и их скорость в момент удара о пластину, можно заметить, что пластина отклонилась на больший угол. Отсюда можно сделать вывод: чем больше скорость движения дробинок, тем больше производимое на пластину давление.

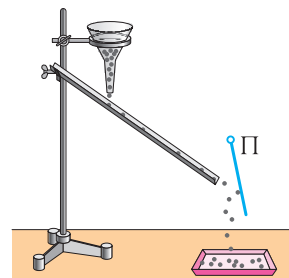


Рис. 13



1. Идеальный газ — модель газа, удовлетворяющая следующим условиям: 1) молекулы газа можно считать материальными точками, которые хаотически движутся; 2) силы взаимодействия между молекулами идеального газа практически отсутствуют (потенциальная энергия взаимодействия равна нулю); они действуют только при столкновениях молекул, причём это силы отталкивания.

2. Уравнение, связывающее микропараметры состояния идеального газа (массу молекулы и её среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$) с его макропараметром (давлением, характеризующим газ как целое), непосредственно измеряемым на опыте, называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа:

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle.$$

3. Давление идеального газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения его молекул и их концентрации:

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{к}} \rangle.$$



1. Перечислите существенные признаки понятия «идеальный газ».
2. Каков механизм возникновения давления газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
3. От каких физических величин зависит давление идеального газа?

4. Какая связь между давлением идеального газа и средней кинетической энергией поступательного движения его молекул?

5. В двух сосудах находится одинаковое число молекул идеального газа. В каком случае давления в сосудах будут одинаковы?

6. В баллон, содержащий некоторое число атомов гелия, добавляют такое же число молекул водорода, средняя кинетическая энергия поступательного движения которых равна средней кинетической энергии теплового движения атомов гелия. Во сколько раз изменится давление в сосуде?

Примеры решения задач

Пример 1. Электрическая лампа наполнена газом, плотность которого $\rho = 0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. После включения лампы давление газа в ней увеличилось от $p_1 = 90 \text{ кПа}$ до $p_2 = 150 \text{ кПа}$. Определите, на сколько при этом увеличился средний квадрат скорости теплового движения молекул газа.

Дано:

$$\rho = 0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$p_1 = 90 \text{ кПа} = 9,0 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$p_2 = 150 \text{ кПа} = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta \langle v^2 \rangle \text{ — ?}$$

Решение. Найдём связь между плотностью ρ газа и концентрацией n его частиц. Плотность вещества равна отношению массы к его объёму. Поскольку произведение массы m_0 одной молекулы и числа N молекул равно массе вещества, то

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m_0 N}{V} = m_0 n.$$

Тогда основное уравнение молекулярно-кинетической теории можно записать в виде $p = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$.

Отсюда средний квадрат скорости теплового движения молекул газа $\langle v^2 \rangle = \frac{3p}{\rho}$. Найдём изменение среднего квадрата скорости теплового движения

молекул газа после включения лампы: $\Delta \langle v^2 \rangle = \frac{3p_2}{\rho} - \frac{3p_1}{\rho} = \frac{3}{\rho} (p_2 - p_1)$.

$$\Delta \langle v^2 \rangle = \frac{3}{0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} (1,50 \cdot 10^5 \text{ Па} - 9,0 \cdot 10^4 \text{ Па}) = 2,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

$$\text{Ответ: } \Delta \langle v^2 \rangle = 2,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$$

Пример 2. В сосуде вместимостью $V = 10$ л находится одноатомный газ, количество вещества которого $\nu = 2,0$ моль и давление $p = 6,0 \cdot 10^5$ Па. Определите среднюю кинетическую энергию теплового движения атомов этого газа.

Дано:

$$V = 10 \text{ л} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$p = 6,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\nu = 2,0 \text{ моль}$$

$\langle E_k \rangle$ — ?

Решение. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории, записанного в виде $p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$,

следует, что $\langle E_k \rangle = \frac{3p}{2n}$. Так как концентрация атомов

$$n = \frac{N}{V}, \text{ а число атомов газа } N = \nu N_A, \text{ то } \langle E_k \rangle = \frac{3p}{2n} = \frac{3pV}{2N} = \frac{3pV}{2\nu N_A}.$$

$$\langle E_k \rangle = \frac{3 \cdot 6,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{2 \cdot 2,0 \text{ моль} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 7,5 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Ответ: $\langle E_k \rangle = 7,5 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Упражнение 2

1. Определите концентрацию молекул кислорода, если среднее значение квадрата их скорости $\langle v^2 \rangle = 4,9 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$, а давление газа $p = 2,0 \cdot 10^5$ Па.

2. В одном из двух одинаковых сосудов находится кислород, а в другом — азот. Число молекул каждого газа и средние значения квадратов их скоростей одинаковые. Определите давление азота, если давление кислорода $p_1 = 32$ кПа.

3. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул кислорода при нормальных условиях, если их концентрация $n = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

4. В баллоне вместимостью $V = 4,0$ л находится $N = 8,0 \cdot 10^{25}$ молекул азота. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул, если давление азота $p = 2,0$ МПа.

5. В баллоне вместимостью $V = 2,5 \text{ м}^3$ находится гелий массой $m = 3,0$ кг. Определите среднее значение квадрата скорости атомов гелия, если его давление $p = 100$ кПа.

6. Во сколько раз изменится давление идеального одноатомного газа, если средняя кинетическая энергия теплового движения его атомов увеличится в три раза, а объём газа уменьшится в два раза?

7*. Как изменится давление идеального газа, если среднее значение квадрата скорости его молекул увеличится на 10 %, а объём газа уменьшится на 50 %?

§ 4. Тепловое равновесие. Температура — мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества. Закон Дальтона

В повседневной жизни под температурой мы понимаем степень нагретости тела (холодное, тёплое, горячее). Такой подход является довольно субъективным, он зависит не только от состояния рассматриваемого тела, но и от наших ощущений. Чтобы избежать субъективной неопределённости, необходимо установить способ измерения температуры.

Тепловое равновесие. Если привести в соприкосновение два тела, то молекулы этих тел будут взаимодействовать между собой. При этом происходит передача энергии от молекул с большей кинетической энергией к молекулам с меньшей кинетической энергией. В результате средняя энергия поступательного движения молекул одного тела увеличивается, а другого — уменьшается. Отдающее энергию тело называют более нагретым, а тело, к которому энергия переходит, — менее нагретым. Как показывает опыт, такой переход энергии продолжается до тех пор, пока не установится некоторое состояние, в котором тела могут находиться сколь угодно долго. В этом состоянии степень нагретости тел становится и остаётся одинаковой, а следовательно, тела имеют одинаковую температуру. Это учитывают при измерении температуры тела. Термометр приводят в соприкосновение с телом, но отсчёт его показаний производят не сразу, а через некоторый промежуток времени. Это необходимо для того, чтобы между термометром и телом установилось тепловое равновесие.

Тепловым равновесием называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры изолированной системы остаются неизменными в течение неограниченно большого промежутка времени. Под *изолированной*, или *замкнутой*, *системой* понимают систему тел, которая не обменивается энергией с окружающими телами.

Отметим, что у тел, входящих в физическую систему, находящуюся в состоянии теплового равновесия, могут быть различные значения плотности, концентрации, давления и объёма. Однако *температура всех тел, входящих в такие системы, всегда одинакова.*

Температура и средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа. Определение температуры должно основываться на такой физической величине, которая характеризует состояние тел и является одинаковой для любых тел, находящихся в состоянии теплового равновесия. Необ-

ходимым свойством обладает *средняя кинетическая энергия теплового движения частиц вещества*. Эту энергию легче всего определять для идеального одноатомного газа, атомы которого совершают только поступательное движение.

Возьмём несколько сосудов разной вместимости, снабжённых манометрами для измерения давления (рис. 14). Заполнив их различными газами, например, аргоном, неоном и гелием, поместим сначала в сосуд с тающим льдом ($t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), а затем будем изменять температуру содержимого сосудов, пока она не станет равной температуре кипения воды ($t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Давления газов в сосудах могут отличаться. Массы газов можно определить взвешиванием откачанных и заполненных сосудов. Зная массу m и молярную массу M газа, по

формуле $N = \frac{m}{M} N_A$ можно вычислить число частиц и, следовательно, определить их концентрацию $n = \frac{N}{V}$ в каждом из сосудов.

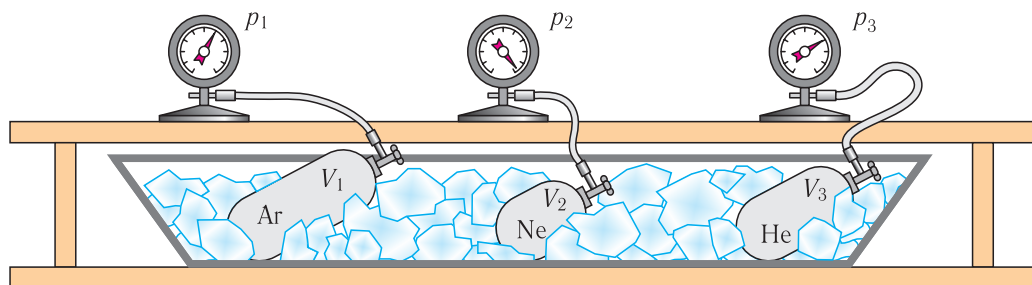


Рис. 14

Опытным путём было установлено, что в состоянии теплового равновесия, несмотря на различные значения давления p и концентрации n частиц, отношение $\frac{p}{n}$ давления к концентрации во всех сосудах оказалось практически

одинаковым: $\frac{p}{n} = \Theta$. Это отношение для разреженных газов (удовлетворяющих требованиям модели «идеальный газ») зависит только от температуры, и эта зависимость является линейной, т. е.

$$\frac{p}{n} = \Theta = k(t - t_0).$$

Здесь Θ характеризует температуру газов в энергетических единицах (в СИ измеряют в джоулях). k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора температурной шкалы. Коэффициент k носит название *постоянной Больцмана* в честь австрийского физика Людвиг Больцмана (1844—1906), одного из основателей молекулярно-кинетической теории газов:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Если для измерения температуры использовать шкалу Кельвина, то при определении числового значения температуры по этой шкале полагают

$$\frac{p}{n} = kT, \text{ т. е. } T = \frac{p}{nk}. \quad (4.1)$$

Соотношение (4.1) позволяет создать температурную шкалу, не зависящую от рода вещества (газа). Такую шкалу, называемую *абсолютной (термодинамической) шкалой температур*, предложил в 1848 г. выдающийся английский физик Уильям Томсон (1824—1907), удостоенный за работы в области физики в 1892 г. титула лорда Кельвина. Поэтому эту шкалу обычно называют *шкалой Кельвина*.

Нулевая точка по шкале Кельвина соответствует самой низкой теоретически возможной температуре (абсолютный нуль температуры). Температура тающего льда по этой шкале $T_0 = 273,15$ К. Связь между температурами по шкале Цельсия (t) и по шкале Кельвина (T) имеет вид $T = t + 273,15$.

Шкала Цельсия Термодинамическая шкала
 $t = T - 273$ $T = t + 273$

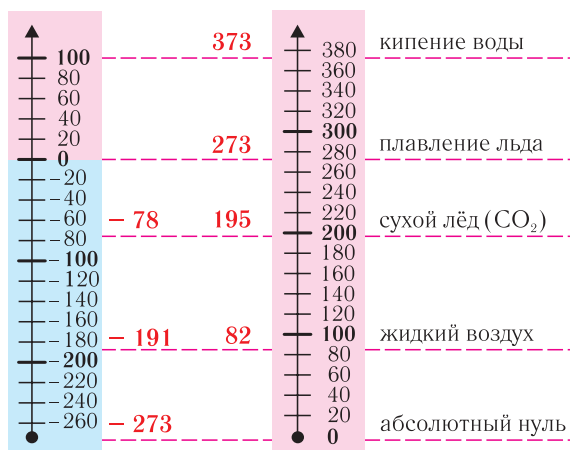


Рис. 15

Единица температуры по абсолютной шкале один кельвин (1К) является основной единицей температуры в СИ и совпадает с одним градусом (1 °C) по шкале Цельсия. Поэтому разность температур по шкале Кельвина и по шкале Цельсия одинакова, т. е. $\Delta T = \Delta t$ (рис. 15).

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа (3.2) следует:

$$\frac{p}{n} = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle, \text{ т. е. } \frac{2}{3} \langle E_k \rangle = kT.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения

молекул газов, находящихся при одинаковой температуре, одинакова для разных газов, причём её значение пропорционально температуре и не зависит от массы молекулы газа:

$$\langle E_{\text{к}} \rangle = \frac{3}{2} kT. \quad (4.2)$$

Данное соотношение устанавливает связь между макроскопическим параметром состояния идеального газа — температурой T и микроскопическим — средней кинетической энергией $\langle E_{\text{к}} \rangle$ поступательного движения его частиц. Таким образом, из формулы (4.2) следует, что *средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц идеального газа пропорциональна его абсолютной температуре*.

Этот вывод, основанный на экспериментах с разреженными газами, справедлив для жидкостей и твёрдых тел.

Уравнение (4.2) можно записать следующим образом: $\frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$, откуда

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

С учётом формулы (4.2) основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа может быть записано в виде

$$p = nkT. \quad (4.3)$$

Из уравнения (4.3) видно, что при одинаковых значениях температуры T и концентрации n частиц давление любых газов одинаково независимо от того, из каких частиц они состоят.

Закон Дальтона. Рассмотрим смесь химически не реагирующих разреженных газов, находящихся в сосуде вместимостью V . Тепловое движение частиц каждого газа равномерно распределяет их по всему объёму сосуда. В результате столкновений частиц друг с другом в смеси устанавливается тепловое равновесие. Докажем, что давление каждого газа, входящего в состав смеси, не зависит от наличия остальных разреженных газов и результирующее давление определяется суммарным давлением всех компонентов смеси газов.

Общее число частиц газов в сосуде $N = N_1 + N_2 + \dots + N_i$, где $N_1, N_2, \dots, N_i$ — число частиц каждого газа.

Обозначим через $p_1, p_2, \dots, p_i$ парциальные давления каждого газа. *Парциальное давление* — давление газа, входящего в состав газовой смеси,

если бы он один занимал весь объём, предоставленный смеси, при той же температуре. Тогда, учитывая соотношение (4.3), запишем:

$$p = nkT = \frac{N}{V}kT = \frac{kT}{V}(N_1 + N_2 + \dots + N_i), \text{ следовательно,}$$

$$\boxed{p = p_1 + p_2 + \dots + p_i.} \quad (4.4)$$

Формула (4.4) является математическим выражением закона, экспериментально установленного в 1801 г. английским учёным Джоном Дальтоном (1766—1844) и называемого *законом Дальтона*. Согласно этому закону **давление смеси химически не реагирующих между собой газов равно сумме парциальных давлений каждого из газов.**

✓ 1. Тепловым равновесием называют такое состояние изолированной физической системы, при котором все её макроскопические параметры остаются неизменными с течением времени. В состоянии теплового равновесия температура различных частей физической системы одинакова.

2. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре: $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$.

3. Средняя квадратичная скорость молекул газа $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$.

4. Давление идеального газа прямо пропорционально концентрации его молекул и абсолютной температуре газа: $p = nkT$.

5. Температурную шкалу, не зависящую от рода вещества, называют абсолютной (термодинамической) шкалой температур (шкалой Кельвина). Температура по шкале Кельвина (T) приближённо связана с температурой по шкале Цельсия (t) соотношением $T = t + 273$.

6. Давление смеси химически не реагирующих между собой разреженных газов равно сумме парциальных давлений каждого из газов (закон Дальтона):

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_i,$$

где парциальное давление — давление газа, входящего в состав газовой смеси, если бы он один занимал весь объём, предоставленный смеси, при той же температуре.



1. Какая величина характеризует состояние теплового равновесия?

2. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа от температуры?

3. Совпадают ли средние квадратичные скорости молекул кислорода и азота в воздухе?
4. При нагревании газа в баллоне средняя квадратичная скорость молекул увеличилась в два раза. Как изменилось давление газа?
5. Что представляет собой абсолютная шкала температур? Что принято за единицу абсолютной температуры в СИ? Каково соотношение между температурами по шкале Цельсия и шкале Кельвина?
6. Как связано давление идеального газа с его температурой и концентрацией молекул?
7. Какое давление называют парциальным? Сформулируйте закон Дальтона.

Примеры решения задач

Пример 1. Сравните средние квадратичные скорости атомов гелия и молекул кислорода, если оба газа находятся в состоянии теплового равновесия.

Дано:

$$M_1 = 4,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$M_2 = 32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

$$T_1 = T_2 = T$$

$$\frac{\langle v_{\text{кв1}} \rangle}{\langle v_{\text{кв2}} \rangle} = ?$$

Решение. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории $p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle$ и уравнения $p = n k T$ следует,

$$\text{что } \langle v^2 \rangle = \frac{3kT}{m_0}.$$

Поскольку $m_0 = \frac{M}{N_A}$, то $\langle v^2 \rangle = \frac{3N_A k T}{M}$. Так как газы находятся в состоянии теплового равновесия, т. е. $T_1 = T_2 = T$,

$$\text{то средние квадраты скоростей атомов гелия } \langle v_1^2 \rangle = \frac{3N_A k T}{M_1},$$

$$\text{молекул кислорода — } \langle v_2^2 \rangle = \frac{3N_A k T}{M_2}.$$

$$\text{Отсюда } \langle v_{\text{кв1}} \rangle = \sqrt{\langle v_1^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3N_A k T}{M_1}}, \quad \langle v_{\text{кв2}} \rangle = \sqrt{\langle v_2^2 \rangle} = \sqrt{\frac{3N_A k T}{M_2}}.$$

$$\text{Тогда } \frac{\langle v_{\text{кв1}} \rangle}{\langle v_{\text{кв2}} \rangle} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{4,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}} = 2\sqrt{2} = 2,8.$$

Ответ: в состоянии теплового равновесия средняя квадратичная скорость атомов гелия в 2,8 раза больше средней квадратичной скорости молекул кислорода.

Пример 2. В баллоне вместимостью $V = 14$ л находится газ, температура которого $T = 290$ К. Расходуя газ, из баллона выпустили $N = 1,0 \cdot 10^{22}$ молекул. Определите, на сколько уменьшилось давление газа в баллоне, если через некоторый промежуток времени его температура увеличилась до первоначального значения.

Дано:
 $V = 14 \text{ л} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$
 $T = 290 \text{ К}$
 $N = 1,0 \cdot 10^{22}$

$p_1 - p_2 = ?$

Решение. Начальное давление газа $p_1 = n_1 k T = \frac{N_1}{V} k T$. Когда израсходовали часть газа, его давление после того, как температура увеличилась до первоначального значения T , стало $p_2 = n_2 k T = \frac{N_2}{V} k T$. Тогда убыль давления газа $p_1 - p_2 = \frac{kT}{V} (N_1 - N_2) = \frac{kTN}{V}$.

$$p_1 - p_2 = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 290 \text{ К} \cdot 1,0 \cdot 10^{22}}{1,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3} = 2,9 \text{ кПа.}$$

Ответ: $p_1 - p_2 = 2,9$ кПа.

Упражнение 3

1. Температура тела по шкале Цельсия $t = -53,0$ °С. Чему равна температура этого тела по шкале Кельвина?

2. Температура тела по абсолютной шкале: а) $T = 473$ К; б) $T = 120$ К. Чему равна температура этого тела по шкале Цельсия в каждом случае?

3. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения частиц идеального газа, температура которого $t = 20$ °С.

4. Определите число молекул идеального газа, температура которого $t = 27$ °С, а давление $p = 3,0$ кПа, находящегося в сосуде вместимостью $V = 1,4$ л.

5. Водород, температура которого $T = 290$ К, а масса $m = 2,0$ кг, находится в сосуде вместимостью $V = 2,0 \text{ м}^3$. Определите давление водорода.

6. Температура воздуха, находящегося в сосуде, $t_1 = 24,0$ °С. На сколько градусов увеличилась температура воздуха, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул увеличилась в два раза?

7. Определите плотность азота, давление которого $p = 1,1 \cdot 10^5$ Па и температура $T = 298$ К.

8*. В некоторых странах температуру измеряют по шкале Фаренгейта. По этой шкале точке заморзания воды соответствует температура $t_3 = 32$ °F, точке её кипения — температура $t_k = 212$ °F. Определите нормальную температуру человеческого тела по шкале Фаренгейта.

9*. На сколько процентов изменится давление идеального газа, находящегося в закрытом сосуде, если средняя квадратичная скорость его молекул увеличится на 20 %?

§ 5. Уравнение состояния идеального газа. Изотермический, изобарный и изохорный процессы

Мы рассмотрели идеальный газ с позиций молекулярно-кинетической теории. Выяснили зависимость давления идеального газа от концентрации его молекул и температуры. Но как связаны между собой давление идеального газа, его масса, объём и температура?

Уравнение состояния идеального газа. Состояние макроскопической системы полностью определено, если известны её макроскопические параметры — давление p , температура T и объём V . Уравнение, которое связывает параметры данного состояния, называют *уравнением состояния системы*. Изменение двух и более параметров состояния системы с течением времени называют *процессом*.

Если при переходе идеального газа из одного состояния в другое число его молекул $N = \frac{m}{M} N_A$ остаётся постоянным, т. е. масса и молярная масса газа не изменяются, то из уравнений $p = nkT$ и $n = \frac{N}{V}$ следует:

$$p_1 V_1 = NkT_1, \quad p_2 V_2 = NkT_2, \quad (5.1)$$

где k — постоянная Больцмана, p_1 , V_1 , T_1 — параметры начального состояния газа, а p_2 , V_2 , T_2 — конечного. Из соотношений (5.1) следует, что

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \quad \text{или} \quad \boxed{\frac{pV}{T} = \text{const.}} \quad (5.2)$$

Уравнение состояния в виде (5.2) впервые вывел в 1834 г. французский физик Бенуа Клапейрон (1799—1864), поэтому его называют уравнением Клапейрона. Таким образом, **при неизменных массе и молярной массе идеального газа отношение произведения его давления и объёма к абсолютной температуре является величиной постоянной**. Уравнение (5.2) связывает два состояния идеального газа независимо от того, каким образом газ перешёл из одного состояния в другое.

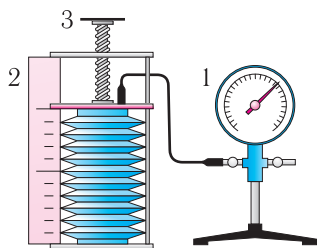


Рис. 16

В справедливости уравнения состояния можно убедиться, используя установку, изображённую на рисунке 16. Манометром 1, соединённым с герметичным гофрированным сосудом, регистрируют давление газа внутри сосуда. Объём газа в сосуде можно измерить, используя линейку 2. Температура газа в сосуде равна температуре окружающей среды и может быть измерена термометром.

Измерив параметры газа p_1 , V_1 , T_1 в началь-

ном состоянии, вычисляют отношение $\frac{p_1 V_1}{T_1}$. После

этого помещают сосуд в горячую воду, тем самым изменяя температуру газа и его давление. Вращая винт 3, изменяют вместимость сосуда. Измерив снова

давление газа p_2 , его объём V_2 и температуру T_2 , вычисляют отношение $\frac{p_2 V_2}{T_2}$.

Как показывают расчёты, уравнение состояния (5.2) выполняется в пределах погрешности эксперимента.

Реальные газы удовлетворяют уравнению состояния идеального газа при не очень больших давлениях (пока собственный объём всех молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с вместимостью сосуда, в котором находится газ) и при не слишком низких или же высоких температурах (пока абсолютное значение потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия пренебрежимо мало по сравнению с кинетической энергией теплового движения молекул).

Поскольку число частиц $N = \frac{m}{M} N_A$, где m — масса газа, M — его молярная масса, N_A — число Авогадро, то из (5.1) следует:

$$pV = kN_A \frac{m}{M} T.$$

Введём новую постоянную R , равную произведению постоянных Больцмана и Авогадро:

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Постоянную R называют *универсальной газовой постоянной*. Тогда

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (5.3)$$

или с учётом того, что количество вещества $\nu = \frac{m}{M}$:

$$pV = \nu RT.$$

Уравнение состояния в виде (5.3) впервые получено русским учёным Д. И. Менделеевым (1834—1907) в 1874 г., поэтому его называют уравнением Клапейрона—Менделеева.

Отметим, что уравнение Клапейрона—Менделеева связывает между собой параметры конкретного состояния идеального газа. Используя уравнение Клапейрона—Менделеева, можно описать различные процессы, происходящие в идеальном газе.

Процессы в газах часто происходят так, что изменяются только два параметра из пяти (p , V , T , m , M). Если один из макропараметров (p , V , T), входящих в уравнение состояния идеального газа, не изменяется, то такие процессы называют *изопроцессами*.

Изотермический процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянной температуре ($T = \text{const}$) называют *изотермическим*. Если масса идеального газа и его молярная масса не изменяются, то из уравнения Клапейрона—Менделеева следует:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}, \text{ или } p = \frac{\nu RT}{V} = \frac{\text{const}}{V}. \quad (5.4)$$

Следовательно, **давление данной массы газа при постоянных молярной массе и температуре обратно пропорционально его объёму**. Это утверждение называют законом Бойля—Мариотта. Закон Бойля—Мариотта описывает изотермический процесс в идеальном газе, масса и молярная масса которого при переходе из начального состояния в конечное не изменяются.

Справедливость закона Бойля—Мариотта можно проверить экспериментально, используя установку, изображённую на рисунке 16. Если поддерживать постоянной температуру газа, то уменьшение его объёма при вращении винта 3 повлечёт за собой увеличение давления, и наоборот, увеличение объёма приведёт к уменьшению давления. Однако произведение pV остаётся постоянным: $pV = \text{const}$.

График такого процесса в координатах (p , V) представляет собой гиперболу (рис. 17). В физике эту кривую называют *изотермой*. Разным значениям температуры соответствуют разные изотермы.

Согласно уравнению состояния $p = \frac{\nu RT}{V}$ для одного

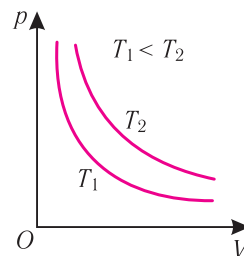


Рис. 17

и того же объёма газа, чем больше давление, тем больше его температура (см. рис. 17).

Опыты показали, что реальные газы подчиняются закону Бойля—Мариотта тем точнее, чем меньше их плотность. При значительном увеличении давления этот закон перестаёт выполняться.

Изотермический процесс можно изобразить и в координатах (p, T) и (V, T) . Сделайте это самостоятельно.

Изобарный процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении ($p = \text{const}$) называют *изобарным*. Впервые он был рассмотрен в 1802 г. французским учёным Жозефом Гей-Люссаком (1778—1850). Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса газа не изменяются, то объём газа, как следует из уравнения Клапейрона—Менделеева (5.3):

$$V = \frac{mR}{pM}T \quad \text{или} \quad V = \frac{\nu R}{p}T, \quad \text{т. е.} \quad V = \text{const } T. \quad (5.5)$$

Таким образом, изобарный процесс в идеальном газе описывает закон, согласно которому **объём данной массы газа при постоянных молярной массе и давлении прямо пропорционален абсолютной температуре**. Справедливость закона Гей-Люссака можно проверить экспериментально, используя установку, изображённую на рисунке 18. Жидкость в сосуде находится в тепловом равновесии с тонкой трубкой, заполненной воздухом, запёртым столбиком масла. При увеличении температуры жидкости объём воздуха, находящегося в трубке под столбиком масла, возрастает, а при уменьшении температуры — уменьшается.

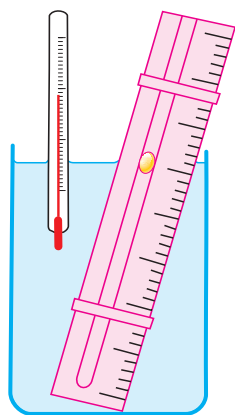


Рис. 18

Поскольку $V \sim T$, то в координатах (V, T) график изобарного процесса для идеального газа представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 19). Эту линию называют *изобарой*. Изобара реального газа не может быть продлена до нулевого значения температуры (на графике пунктирная линия), потому что при низких температурах все газы начинают существенно отличаться от модели «идеальный газ» и при дальнейшем уменьшении температуры превращаются в жидкости. В одних и тех же координатах (V, T) можно построить несколько изобар, которые будут соответствовать разным давлениям данной массы идеального газа при неизменной молярной массе.

Анализ графиков (см. рис. 19) и соотношения

$V = \frac{mR}{pM}T$ позволяет сделать вывод, что большему давлению p соответствует меньший наклон изобары к оси температур T .

Изобарный процесс можно изобразить и в координатах (p, V) и (p, T) . Сделайте это самостоятельно.

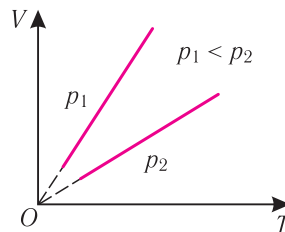


Рис. 19



Уравнение (5.5) изобарного процесса можно записать в другом виде. Пусть данная масса идеального газа при давлении p и температуре $T_0 = 273,15$ К занимает некоторый объем V_0 . Уравнение состояния газа для этого случая имеет вид

$$\frac{pV_0}{T_0} = \frac{m}{M}R.$$

Будем считать, что газ изобарно нагрели до температуры $T = 273,15 + t$, где t — температура по шкале Цельсия. Для этого состояния можно записать $\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R$.

После сопоставления двух равенств приходим к выводу, что $\frac{V_0}{T_0} = \frac{V}{T}$. Тогда

$$V = V_0 \left(1 + \frac{1}{273,15} t \right).$$

Отношение $\frac{1}{273,15} = \alpha$, являющееся постоянной величиной для всех разреженных газов, называют *температурным (термическим) коэффициентом объёмного расширения газа* при постоянном давлении, который характеризует относительное увеличение объёма газа при изменении его температуры на один градус. Коэффициент α измеряют в K^{-1} . С учётом этого уравнение для изобарного процесса будет иметь вид

$$V = V_0(1 + \alpha t).$$

Как видно из последнего соотношения, объём данной массы газа при постоянном давлении линейно возрастает с ростом температуры.

Изохорный процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянном объёме ($V = \text{const}$) называют *изохорным*. Впервые он был рассмотрен в 1787 г. французским учёным Жаком Шарлем (1746—1823). Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса газа не изменяются,

то давление газа, как следует из уравнения Клапейрона—Менделеева (5.3):

$$p = \frac{mR}{VM}T \quad \text{или} \quad p = \frac{\nu R}{V}T, \quad \text{т. е.} \quad p = \text{const } T. \quad (5.6)$$

Таким образом, изохорный процесс в идеальном газе описывает закон, согласно которому **давление данной массы газа при постоянных молярной массе и объёме прямо пропорционально абсолютной температуре**. Справедливость закона Шарля можно проверить экспериментально, используя установку, изображённую на рисунке 20. Колба с воздухом, соединённая с манометром, находится в тепловом равновесии с жидкостью в сосуде. При увеличении температуры жидкости давление воздуха в колбе возрастает, а при уменьшении температуры давление воздуха уменьшается.

В координатах (p, T) график изохорного процесса для идеального газа, масса и молярная масса которого постоянны, представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 21). Эту линию называют *изохорой*.

Как и в случае изобарного процесса, изохора реального газа не может быть продлена до нулевого значения температуры. Изохору можно изобразить и в координатах (p, V) и (V, T) . Сделайте это самостоятельно.

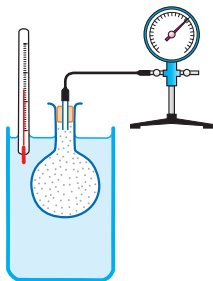


Рис. 20

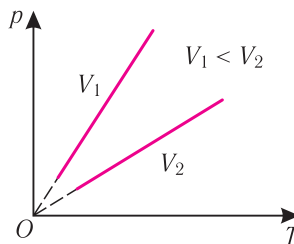


Рис. 21

В одних и тех же координатах (p, T) можно построить несколько изохор, соответствующих разным объёмам данной массы газа при неизменной молярной массе. Анализ соотношений (5.6) показывает, что большему объёму V соответствует меньший наклон изохор к оси температур T (см. рис. 21).



Если температуру t измерять по шкале Цельсия, то $p = p_0(1 + \gamma t)$, где p_0 — давление газа при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$, γ — температурный коэффициент давления, который для всех разреженных газов $\gamma = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1}$.



1. При постоянных массе и молярной массе идеального газа отношение произведения давления газа и его объёма к абсолютной температуре является величиной постоянной (уравнение состояния идеального газа):

$$\frac{pV}{T} = \text{const}, \quad pV = \frac{m}{M}RT.$$

2. Давление данной массы идеального газа при постоянных молярной массе и температуре обратно пропорционально объёму газа (изотермический процесс):

$$p = \frac{\text{const}}{V}.$$

3. Объём данной массы идеального газа при постоянных молярной массе и давлении прямо пропорционален абсолютной температуре (изобарный процесс):

$$V = \text{const } T.$$

4. Давление данной массы идеального газа при постоянных молярной массе и объёме прямо пропорционально абсолютной температуре (изохорный процесс):

$$p = \text{const } T.$$



1. Что называют уравнением состояния идеального газа? Как связаны параметры идеального газа в данном уравнении?

2. Как связаны давление и объём идеального газа при изотермическом процессе?

3. Как связаны объём и температура идеального газа при изобарном процессе?

4. Как связаны давление и температура идеального газа при изохорном процессе?

5. При каких условиях справедлив каждый из законов для изопроцессов в реальном газе?

6*. Какой воздух тяжелее — сухой или влажный (при одинаковых температуре и давлении)?

Примеры решения задач

Пример 1. В двух сосуда вместимостью $V_1 = 20$ л и $V_2 = 30$ л находятся химически не реагирующие идеальные газы, давления которых $p_1 = 1,0$ МПа и $p_2 = 0,40$ МПа соответственно. Определите давление в сосудах, после того как их соединили тонкой короткой трубкой. Температура газов до и после соединения сосудов одинаковая.

Дано:

$$V_1 = 20 \text{ л} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 30 \text{ л} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$p_1 = 1,0 \text{ МПа} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$p_2 = 0,40 \text{ МПа} = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T = \text{const}$$

$$p = ?$$

Решение. Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений (закон Дальтона): $p = p'_1 + p'_2$.

Найдём парциальные давления газов после соединения сосудов. Так как температура и массы газов не изменяются, то начальное и конечное состояния каждого из газов связаны законом Бойля—Мариотта, т. е. $p_1 V_1 = p'_1 (V_1 + V_2)$,

$p_2 V_2 = p'_2 (V_1 + V_2)$. Отсюда парциальные давления газов после соединения со-

судов соответственно: $p'_1 = \frac{p_1 V_1}{V_1 + V_2}$, $p'_2 = \frac{p_2 V_2}{V_1 + V_2}$. Следовательно, $p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}$.

$$p = \frac{1,0 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 + 4,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3}{2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 + 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3} = 6,4 \cdot 10^5 \text{ Па} = 0,64 \text{ МПа}.$$

Ответ: $p = 0,64 \text{ МПа}$.

Пример 2. Баллон с газом, давление которого $p_1 = 2,84 \text{ МПа}$, находился в неотапливаемом помещении, где температура воздуха $t_1 = 7^\circ \text{С}$. После того как некоторое количество газа было израсходовано, баллон внесли в помещение, где температура воздуха $t_2 = 27^\circ \text{С}$. Определите, какая часть газа была израсходована, если после длительного пребывания баллона в помещении давление газа в нём стало $p_2 = 1,52 \text{ МПа}$.

Дано:

$$p_1 = 2,84 \text{ МПа} = 2,84 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$T_1 = 280 \text{ К}$$

$$T_2 = 300 \text{ К}$$

$$p_2 = 1,52 \text{ МПа} = 1,52 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = ?$$

Решение. Если пренебречь тепловым расширением баллона, то его вместимость не изменяется. Запишем уравнения Клапейрона—Менделеева для начального и конечного состояний газа, считая его идеальным:

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1, \quad p_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2, \quad \text{откуда } m_1 = \frac{p_1 V M}{R T_1},$$

$$m_2 = \frac{p_2 V M}{R T_2}.$$

$$\text{Тогда } \frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{\frac{V M}{R} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right)}{\frac{V M p_1}{R T_1}} = 1 - \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}.$$

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - \frac{1,52 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 280 \text{ К}}{2,84 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 300 \text{ К}} = 0,50.$$

Ответ: $\frac{m_1 - m_2}{m_1} = 0,50.$

Пример 3. На рисунке 22 изображён график процесса изменения состояния некоторой массы идеального газа. Как изменялись параметры газа на участках $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$? Изобразите этот процесс в координатах (p, V) и (p, T) .

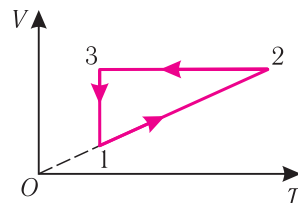


Рис. 22

Решение. На участке $1 \rightarrow 2$ объём газа прямо пропорционален температуре, следовательно, процесс перехода газа из состояния 1 в состояние 2 является изобарным. Из графика видно, что в состоянии 2 температура и объём газа больше, чем в состоянии 1. Следовательно, в процессе изобарного расширения некоторой массы газа из состояния 1 в состояние 2 температура и объём газа увеличились. Это можно записать таким образом:

переход $1 \rightarrow 2$: $p = \text{const}$, $V \uparrow$, $T \uparrow \Rightarrow$
происходит изобарное нагревание газа.

В процессе перехода газа из состояния 2 в состояние 3 остаётся постоянным объём (процесс изохорный), а температура газа уменьшается. Непосредственно из графика не видно, что будет происходить с давлением газа, но из соотношения (5.6) следует, что при изохорном охлаждении давление газа уменьшается пропорционально его температуре. Поэтому можно записать:

переход $2 \rightarrow 3$: $V = \text{const}$, $T \downarrow$, $p \downarrow \Rightarrow$
происходит изохорное охлаждение газа.

Процесс перехода газа из состояния 3 в состояние 1 — изотермический. При этом объём газа уменьшается, что влечёт за собой, согласно закону Бойля—Мариотта, увеличение давления газа:

переход $3 \rightarrow 1$: $T = \text{const}$, $V \downarrow$, $p \uparrow \Rightarrow$
происходит изотермическое сжатие газа.

Опираясь на сделанные выводы, изобразим все три процесса в координатах (p, V) и (p, T) (рис. 23, а, б).

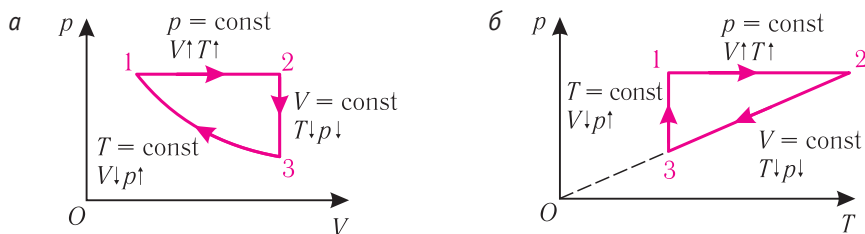


Рис. 23

Упражнение 4

1. Определите число молей идеального газа, находящегося в сосуде вместимостью $V=480 \text{ см}^3$ при нормальных условиях.

2. В сосуде вместимостью $V=2,0 \text{ л}$ находится кислород массой $m_1=4,0 \text{ г}$ и азот массой $m_2=7,0 \text{ г}$. Определите давление смеси газов, если её температура $T=300 \text{ К}$.

3. Баллон вместимостью $V_1=15 \text{ л}$, содержащий газ, давление которого $p_1=2,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$, соединили с пустым баллоном вместимостью $V_2=5,0 \text{ л}$. Определите давление газа, которое установилось в баллонах, если температура после расширения газа установилась такой же, как и до расширения.

4. При изобарном увеличении температуры идеального газа, находящегося в герметично закрытом цилиндре, на $\Delta T=60,0 \text{ К}$ его объём увеличился в $\beta=1,21$ раза. Определите начальную температуру газа.

5. Изобразите графически процесс изобарного охлаждения определённой массы идеального газа в координатах (p, T) ; (V, T) ; (V, p) .

6. Идеальный газ определённой массы сначала изобарно расширили, а затем изотермически сжали до первоначального объёма. Изобразите графически эти процессы в координатах (V, T) ; (p, V) .

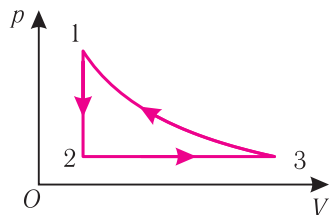


Рис. 24

7. На рисунке 24 изображён график изменения состояния определённой массы идеального газа. (Переход $3 \rightarrow 1$ осуществляется при постоянной температуре.) Изобразите графически этот процесс в координатах (T, V) и (p, T) .

8. Азот, объём которого $V_1=2,9 \text{ м}^3$, температура $T_1=293 \text{ К}$ и давление $p_1=2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, перевели в жидкое состояние. Определите объём, занимаемый

жидким азотом, если его плотность $\rho=0,86 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

9. При температуре $t_1 = -3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ манометр на баллоне со сжатым кислородом показывал давление $p_1 = 1,8 \cdot 10^6\text{ Па}$, а при температуре $t_2 = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ — давление $p_2 = 2,0 \cdot 10^6\text{ Па}$. Определите, была ли утечка газа из баллона.

10*. Идеальный газ, давление которого $p_1 = 4,0 \cdot 10^5\text{ Па}$, занимал объём $V_1 = 2,0\text{ л}$. Сначала газ изотермически расширили до объёма $V_2 = 8,0\text{ л}$, а затем изохорно нагрели, в результате чего его температура увеличилась в три раза. Определите давление газа в конце процесса, если при переходе из начального состояния в конечное масса газа оставалась постоянной.

§ 6. Строение и свойства твёрдых тел

В повседневной жизни мы считаем твёрдым любое тело, сохраняющее форму и объём в отсутствие внешних воздействий. Например, мы считаем твёрдыми тела, изготовленные из металлов, пластмассы, льда, стекла. Твёрдые тела делят на две группы, различающиеся по своим свойствам: кристаллические и аморфные. К кристаллическим телам относят минералы, например поваренную соль, медный купорос, кварц, квасцы, горный хрусталь, и металлы в твёрдом состоянии; к аморфным телам — опал, обсидиан, эбонит, сургуч, стекло, различные пластмассы, смолы (вар, канифоль, янтарь) и др. В чём отличие между кристаллическими и аморфными твёрдыми телами?

Кристаллы. Кристаллами называют такие твёрдые тела, атомы, ионы или молекулы которых совершают тепловые колебания около определённых, упорядоченных в пространстве положений равновесия. Упорядоченное размещение частиц твёрдого кристаллического тела обуславливает его правильную геометрическую форму, вследствие чего поверхность кристалла образована плоскими гранями (рис. 25).



Рис. 25

Частицы кристалла удерживаются на определённом усреднённом расстоянии друг от друга ($\sim 0,1$ нм) силами межатомного и межмолекулярного взаимодействия. Несмотря на тепловые колебания, они образуют упорядоченную пространственную структуру, геометрическим образом которой является кристаллическая решётка. Узлы кристаллической решётки — это положения устойчивого равновесия колеблющихся частиц (ионов, атомов или молекул), из которых состоит кристалл. Основой строения кристалла служит так называемая элементарная кристаллическая ячейка — многогранник наименьших размеров, последовательным переносом которого вместе с частицами, находящимися внутри этого многогранника, можно построить весь кристалл. На рисунке 26 показаны самые простые элементарные ячейки: кубические (a — примитивная, b — объёмно-центрированная, $в$ — гранецентрированная) и гексагональная призма ($г$).

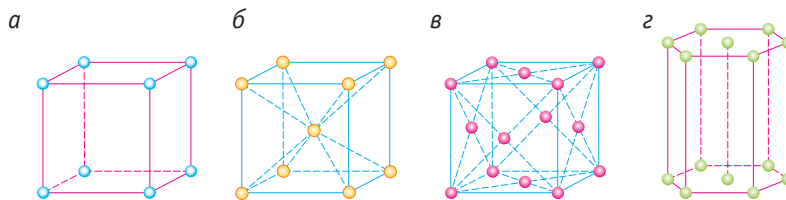


Рис. 26

В кристаллических телах упорядоченное размещение частиц повторяется во всём объёме кристалла, поэтому говорят, что в кристалле существует *дальний порядок* в расположении частиц.

В зависимости от вида частиц, из которых состоит кристалл, и от характера сил взаимодействия между ними, различают четыре основных типа кристаллов: *ионные, атомные, металлические и молекулярные*. В узлах ионной кристаллической решётки размещены положительно и отрицательно заряженные ионы, «связанные» между собой электростатическими силами. Типичным примером ионного кристалла является кристалл хлорида натрия NaCl (рис. 27). Кристаллы с ионной решёткой тугоплавки и обладают высокой твёрдостью.

В узлах атомной кристаллической решётки находятся нейтральные атомы. Связь между атомами осуществляется электронными парами — по одному валентному электрону от каждого атома. Примером атомных кристаллов могут служить алмаз и графит. Эти кристаллы тождественны по химической природе (они состоят из атомов углерода), но отличаются по своему строению (рис. 28). Это существенно сказывается на их свойствах: алмаз — твёрдый минерал (рис. 28, а), графит — наоборот, мягкий и крохкий (рис. 28, б).

В узлах кристаллической решётки металлов находятся положительные ионы, например, полония Po (рис. 26, а), железа Fe (рис. 26, б), серебра Ag (рис. 26, в), магния Mg (рис. 26, г). Между колеблющимися ионами непрерывно движутся свободные электроны.

В узлах молекулярных кристаллических решёток находятся молекулы. Большинство простых веществ неметаллов в твёрдом состоянии, например иод I_2 (рис. 29, а), водород H_2 , кислород O_2 , и их соединений друг с другом, например лёд H_2O (рис. 29, б), а также практически все твёрдые органические вещества образуют молекулярные кристаллы.

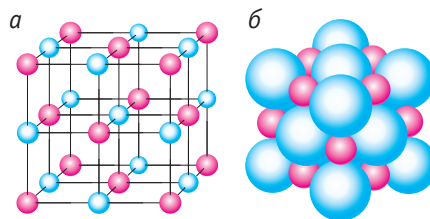


Рис. 27

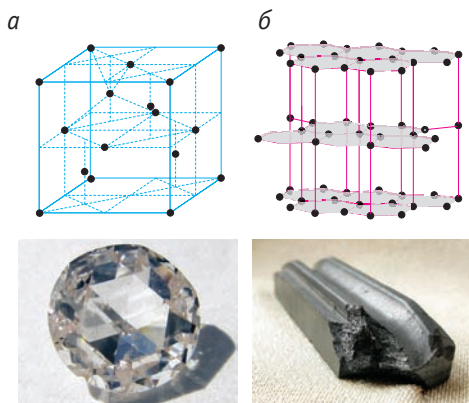


Рис. 28

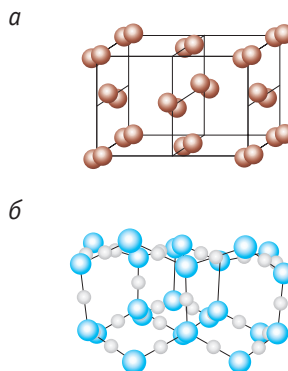


Рис. 29

Твёрдые тела, имеющие во всём объёме единую кристаллическую решётку, называют *монокристаллами*. Это одиночные кристаллы, которые могут иметь довольно большие размеры (встречаются кристаллы горного хрусталя, размеры которых соизмеримы с ростом человека). Многие твёрдые тела состоят из большого числа сросшихся между собой маленьких кристаллов. Такие твёрдые тела называют *поликристаллами*. Вы сами можете в домашних условиях вырастить монокристаллы (рис. 30, а) и поликристаллы (рис. 30, б) медного купороса (сульфата меди(II) $CuSO_4$).

Характерной особенностью монокристаллов является их анизотропия, т. е. зависимость физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления. Анизотропия монокристаллов обусловлена взаимо-

действием частиц и их упорядоченным расположением. На рисунке 31 показано, что расстояния между атомными плоскостями в кристалле неодинаковы ($d_1 < d_2$). Поэтому, в частности, отличаться будут и модули сил, необходимых для его разрыва ($F_1 > F_2$).

а



б



Рис. 30

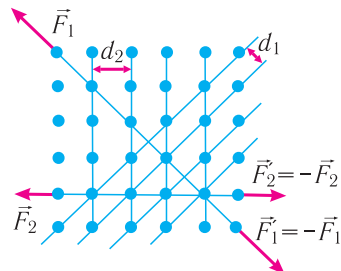
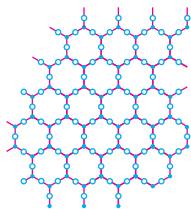


Рис. 31

В отличие от монокристаллов поликристаллы изотропны, т. е. их свойства одинаковы по всем направлениям. Это следствие того, что поликристалл состоит из большого количества хаотически ориентированных маленьких монокристаллов.

Аморфные тела. *Аморфное состояние* (от греч. *amorphous* — бесформенный) — твёрдое некристаллическое состояние вещества, характеризующееся изотропией свойств и отсутствием определённой температуры плавления.

а



б

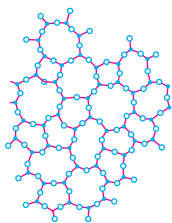


Рис. 32

При повышении температуры аморфное вещество размягчается и постепенно переходит в жидкое состояние. В аморфном состоянии вещество не имеет строгого порядка в расположении атомов и молекул. На рисунке 32 схематически изображено строение кристаллического кварца (рис. 32, а) и аморфного кварца (рис. 32, б). Аморфное состояние — бесформенное состояние со слабо выраженной текучестью. Аморфные тела называют переохлаждёнными жидкостями, так как у них, как и у жидкостей, существует только ближний порядок расположения частиц.

Аморфные тела при определённых условиях могут кристаллизоваться. Сахар-песок является кристаллическим телом. Если его расплавить, то, застывая, он превращается в прозрачный стеклообразный леденец, который является аморфным телом. Через некоторый промежуток времени леденец «засахаривается», т. е. опять становится кристаллическим.

При скоростях охлаждения, превышающих миллион градусов в секунду, удалось получить аморфные металлические сплавы — стеклообразные металлы. Аморфный металл чрезвычайно твёрд и прочен. Его используют как режущий инструмент. Он обладает высокими магнитными свойствами, поэтому незаменим при изготовлении магнитных головок для звуко- и видеозаписи. Кроме того, аморфные металлы обладают высокой антикоррозийной стойкостью.



1. Твёрдые тела делят на две группы, различающиеся по своим свойствам: кристаллические и аморфные.

2. Атомы, ионы или молекулы в твёрдых кристаллических телах совершают тепловые колебания около определённых, упорядоченных в пространстве положений равновесия.

3. Монокристаллическим телам присуща анизотропия, т. е. зависимость физических свойств от направления. Поликристаллические тела изотропны, т. е. их физические свойства одинаковы по всем направлениям.

4. Аморфное состояние — твёрдое некристаллическое состояние вещества, характеризующееся изотропией свойств и отсутствием определённой температуры плавления.



1. Какие тела называют твёрдыми?
2. Каковы особенности строения кристаллических твёрдых тел?
3. В чем отличие между моно- и поликристаллами?
4. Какие типы кристаллов вы знаете? Чем они отличаются друг от друга?
5. Чем отличаются основные физические свойства кристаллических и аморфных тел?

§ 7. Строение и свойства жидкостей.

Поверхностное натяжение

Среднее расстояние между молекулами вещества в жидком состоянии меньше (рис. 33, а), чем среднее расстояние между молекулами этого же вещества в газообразном состоянии (рис. 33, б). Оно равно приблизительно одному-двум диаметрам молекулы. Это приводит к тому, что плотность жидкости приблизительно в 10^3 раз превышает плотность пара, находящегося в динамическом равновесии с жидкостью (насыщенного пара). Например, плотность воды при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в $1,67 \cdot 10^3$ раз больше плотности насыщенного водяного пара. Свойства жидкостей зависят как от особенностей движения молекул, так и от взаимодействия между ними.

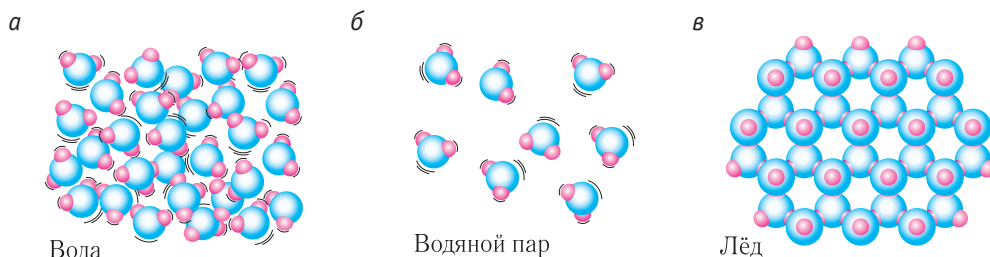


Рис. 33

Строение и свойства жидкостей. В опытах по рассеянию рентгеновских лучей в жидкостях обнаружен ближний порядок в расположении частиц (см. рис. 33, *а*). В отличие от твёрдых тел (рис. 33, *в*) в жидкостях упорядоченность в расположении молекул сохраняется лишь среди ближайших соседей (на расстояниях, равных нескольким диаметрам молекул), сочетаясь с непрерывными и беспорядочными колебаниями около положений равновесия. Средняя кинетическая энергия колебаний молекул определяет температуру жидкости. Молекулы, получившие дополнительную энергию в результате столкновений с другими молекулами, могут «перепрыгнуть» в новое положение равновесия. Таким образом, ближний порядок в жидкости постоянно разрушается в результате теплового движения молекул и вновь создаётся силами молекулярного действия.

Расстояния между молекулами, соизмеримые с их собственными размерами, и возможность молекул относительно свободно перемещаться определяют свойства жидкостей. Жидкости, как и твёрдые тела, практически несжимаемы, но они текучи, поэтому их форма определяется формой предоставленного им сосуда. На форму жидкости оказывают влияние внешние силы (например, сила тяжести совместно с силами реакции дна и стенок сосуда, в котором находится жидкость) и силы поверхностного натяжения.

Поверхностное натяжение. Рассмотрим явления, происходящие на границе раздела жидкости с воздухом или с её паром. Своим возникновением эти явления обязаны особым физическим условиям, в которых находятся молекулы поверхностного слоя жидкости.

В поверхностном слое жидкости проявляется некомпенсированность молекулярных сил притяжения. В самом деле, любая молекула внутри жидкости со всех сторон окружена соседними (одинаковыми) молекулами, действие которых взаимно компенсируется (рис. 34). Поэтому здесь молекулярные силы притяжения уравниваются и равнодействующая этих сил равна нулю. Так как концентрация молекул в воздухе (паре) значительно меньше, чем в жидкости,

то равнодействующая сил притяжения каждой молекулы поверхностного слоя к молекулам газа меньше равнодействующей сил её притяжения к молекулам жидкости. Таким образом, равнодействующие сил притяжения, действующих на молекулы поверхностного слоя, направлены внутрь жидкости. Под действием этих сил молекулы поверхностного слоя втягиваются внутрь, число молекул на поверхности уменьшается и площадь поверхности жидкости сокращается до определённой величины.

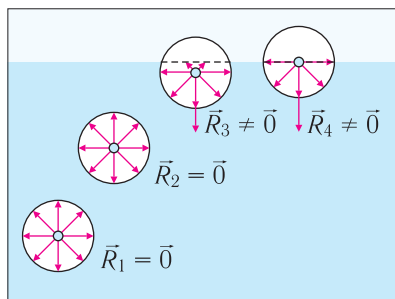


Рис. 34

Толщина поверхностного слоя, в котором проявляется нескомпенсированность сил молекулярного притяжения, равна приблизительно радиусу сферы молекулярного действия (~ 1 нм). Под действием сил притяжения и вследствие текучести жидкости на её поверхности остаётся такое количество молекул, при котором площадь поверхности минимальна для данного объёма жидкости. Процесс сокращения площади поверхности на этом прекращается, жидкость переходит в состояние равновесия. В этом состоянии силы притяжения молекул поверхностного слоя, направленные внутрь жидкости, уравниваются силами отталкивания, возникшими при сближении молекул поверхностного слоя с молекулами внутри жидкости, вызванном её сжатием.

Чтобы переместить молекулу, расположенную внутри жидкости, на поверхность (увеличить площадь поверхности жидкости), необходимо совершить работу против сил взаимодействия этой молекулы с молекулами поверхностного слоя жидкости. Следовательно, молекулы, образующие поверхностный слой жидкости, обладают избыточной потенциальной энергией по сравнению с молекулами, находящимися внутри жидкости. Эту энергию называют *поверхностной энергией*.

Так как потенциальная энергия тела (системы тел) в состоянии устойчивого равновесия минимальна, то наличие поверхностной энергии $E_{\text{пов}}$ у жидкости обуславливает её стремление к сокращению площади S своей поверхности. Работу внешних сил по увеличению площади поверхности жидкости на единицу площади при сохранении объёма и температуры жидкости неизменными называют *коэффициентом поверхностного натяжения* σ или, кратко, *поверхностным натяжением*. Эту физическую скалярную величину можно определить по формуле

$$\sigma = \frac{E_{\text{пов}}}{S}. \quad (7.1)$$

Минимальную площадь поверхности при данном объёме имеют шарообразные тела. Например, капли жидкости при соприкосновении сливаются в одну, форма которой отличается от сферической только из-за действия силы тяжести и силы реакции опоры. Чем меньше радиус капли, тем большую роль играет поверхностная энергия по сравнению с потенциальной энергией капли в гравитационном поле Земли и тем ближе форма капель жидкости на опоре к сферической. Поэтому маленькие капельки росы на листьях растений принимают форму, близкую к шарообразной (рис. 35).

Рассмотрим следующий опыт. Опустим проволочное кольцо с привязанной к нему нитью в мыльный раствор. Контур кольца, извлечённого из раствора, затянут мыльной плёнкой, а нить в ней размещается случайным образом (рис. 36, а). Если проколоть плёнку с одной стороны нити, то оставшаяся часть плёнки сократится так, что площадь её поверхности станет минимальной (рис. 36, б). Нить удерживается в натянутом состоянии силами, получившими название *сил поверхностного натяжения*. Они направлены по касательным к свободным поверхностям плёнки перпендикулярно к линии, ограничивающей эти поверхности.

Рассмотрим ещё один опыт. Прямоугольную рамку с подвижной перекладиной длиной l опустим в мыльный раствор. После извлечения рамки из раствора видим, что перекладина перемещается, так как мыльная плёнка стремится сократить площадь своей поверхности. Чтобы перекладину удержать в равновесии, к ней следует приложить силу $\vec{F}_{\text{вн}}$, которая уравновесит действующие на каждой из двух поверхностей плёнки силы поверхностного натяжения: $\vec{F}_{\text{вн}} = \vec{F}_{\text{н}_2} + \vec{F}_{\text{н}_3} = 2\vec{F}_{\text{н}}$, так как $\vec{F}_{\text{н}_1} = \vec{F}_{\text{н}_2} = \vec{F}_{\text{н}}$ (рис. 37). Если проводить опыты с рамками разных размеров, можно установить, что отношение $\frac{F_{\text{н}}}{l}$ для плёнки



Рис. 35

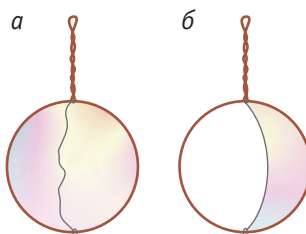


Рис. 36

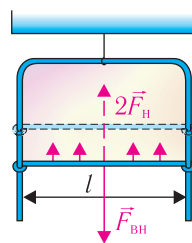


Рис. 37

данной жидкости при фиксированной температуре всегда одинаковое. Значит, это отношение можно взять в качестве характеристики поверхностного слоя жидкости:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}.$$

Поверхностное натяжение σ численно равно отношению модуля силы поверхностного натяжения $F_{\text{н}}$, действующей на прямолинейный участок границы поверхностного слоя жидкости, к длине l этого участка.

Силовое определение поверхностного натяжения дополняет энергетическое. Единицей поверхностного натяжения в СИ является джоуль на метр

в квадрате $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}\right)$ или ньютон на метр $\left(\frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$. Покажите самостоятельно, что

$$1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Поверхностное натяжение зависит от рода жидкости и той среды, с которой она граничит, наличия растворённых в жидкости других веществ и от её температуры. Повышение температуры жидкости, добавление в неё так называемых поверхностно-активных веществ (мыло, жирные кислоты) приводит к уменьшению поверхностного натяжения. Чрезвычайно разнообразны проявления сил поверхностного натяжения жидкости в природе и технике. Поверхностное натяжение приводит к тому, что вода собирается в капли (рис. 38), образуются мыльные пузыри (рис. 39), жук-водомерка передвигается по поверхности воды (рис. 40), а в состоянии невесомости любой объём жидкости принимает сферическую форму.



Рис. 38



Рис. 39



Рис. 40

Смачивание. На границе соприкосновения твёрдых тел, жидкостей и газов наблюдается явление *смачивания* или *несмачивания*, являющееся результатом взаимодействия между молекулами жидкости, твёрдого тела и газа, которое приводит к искривлению поверхности жидкости около поверхности твёрдого тела на границе с газом. При контакте жидкости с твёрдым телом возможны случаи, когда жидкость смачивает (частично или полностью) или не смачивает (частично или полностью) его. Так, ртуть хорошо смачивает чистые поверхности металлов и не смачивает чистое стекло. Вода хорошо смачивает чистое стекло и не смачивает жирные поверхности.

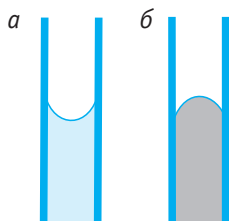


Рис. 41

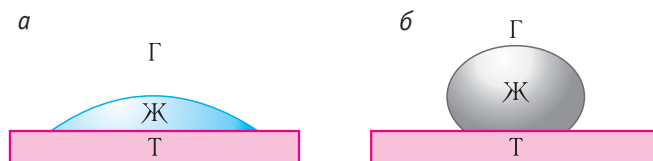


Рис. 42

Свободная поверхность жидкости на границе с твёрдым телом искривляется, образуя *мениск*. Если жидкость смачивает поверхность тела, образуется вогнутый мениск (рис. 41, а), если не смачивает — выпуклый мениск (рис. 41, б). На границе соприкосновения трёх сред — твёрдой, жидкой и газообразной — жидкость принимает такую форму, при которой сумма потенциальной энергии жидкости в гравитационном поле Земли и поверхностной энергии всех тел минимальна (твёрдые тела также обладают поверхностной энергией). Поверхностное натяжение на границе твёрдого тела и жидкости обозначают $\sigma_{\text{тж}}$, на границе твёрдого тела и газа — $\sigma_{\text{тг}}$, на границе жидкости и газа — $\sigma_{\text{жг}}$. Если $\sigma_{\text{тг}} \geq \sigma_{\text{тж}} + \sigma_{\text{жг}}$, то жидкость полностью смачивает поверхность твёрдого тела, покрывая его тонкой плёнкой. Если $\sigma_{\text{тж}} \geq \sigma_{\text{тг}} + \sigma_{\text{жг}}$, то жидкость полностью не смачивает поверхность твёрдого тела, стягиваясь в каплю, несколько сплюснутую действием силы тяжести и силы реакции опоры. В большинстве случаев имеет место частичное смачивание (рис. 42, а) или частичное несмачивание (рис. 42, б).

Явление смачивания используют в промышленности и в быту. Хорошее смачивание необходимо при окраске и мытье разных тканей, нанесении лакокрасочных покрытий и т. д. На явлении смачивания основано склеивание различных изделий. Покрытие металлических изделий масляной плёнкой для их защиты от коррозии основано на несмачивании водой жирных поверхностей.

Непромокаемую одежду изготавливают из тканей, которые не смачиваются водой. Со свойством смачивания связана пайка металлов. Чтобы расплавленный припой хорошо растекался по поверхности металлических изделий и прилипал к ним, нужно эти поверхности очистить от жира, пыли и оксидной плёнки.

Капиллярные явления. Под *капиллярными явлениями* понимают явление подъёма или опускания жидкости в узких трубках, называемых капиллярами. Если жидкость смачивает стенки капилляра, то при его опускании в сосуд с этой жидкостью уровень жидкости в капилляре будет выше, чем в сосуде (рис. 43, а). При несмачивании уровень жидкости в капилляре устанавливается ниже уровня жидкости в сосуде (рис. 43, б). Такое явление наблюдается, например, при опускании стеклянного капилляра в сосуд с ртутью.

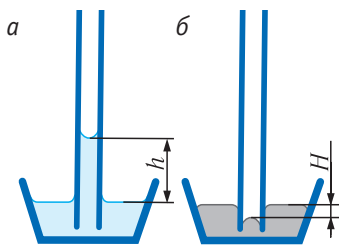


Рис. 43

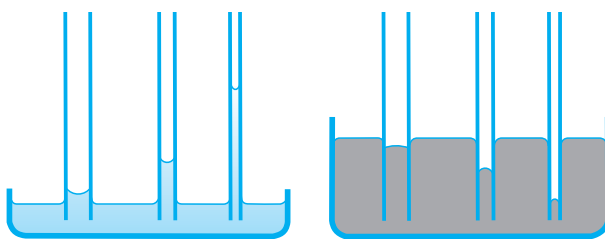


Рис. 44

Высота подъёма (опускания) жидкости в капилляре зависит от свойств жидкости и радиуса капилляра (рис. 44). Если жидкость полностью смачивает капилляр, то высоту подъёма жидкости в капилляре определяют по формуле

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r},$$

где r — внутренний радиус капилляра, σ — поверхностное натяжение жидкости, ρ — плотность жидкости. Если жидкость полностью не смачивает капилляр, то h — глубина, на которую опускается жидкость в капилляре.

Капиллярные явления играют значительную роль в природе и технике. Так, ствол, ветви, стебель и листья растений пронизаны множеством капиллярных каналов, по которым поступают питательные вещества. По капиллярам в почве грунтовые воды поднимаются к корневой системе растений. Мелкие кровеносные сосуды человека и животных можно также рассматривать как капилляры. Капиллярные явления довольно часто встречаются и в быту. Полотенца хорошо впитывают в себя воду при вытирании, в авторучке чернила поступают к перу по капилляру. Чтобы избежать поглощения воды кожаной обувью, её насыщают

жирным гуталином. Капиллярные явления лежат в основе множества технических процессов: при смазке деталей машин и механизмов применяют фитильный способ; при окраске кожи и тканей краска заполняет капилляры изделия; при строительстве домов фундамент отделяют от стен рубероидом или битумом, чтобы избежать капиллярного подъёма воды из почвы.



1. Расстояния между молекулами, соизмеримые с их собственными размерами, и подвижность молекул определяют свойства жидкостей: малую зависимость объёма жидкости от давления и её текучесть.

2. Работу внешних сил по увеличению площади поверхности жидкости на единицу площади при сохранении объёма и температуры жидкости неизменными называют коэффициентом поверхностного натяжения (поверхностным натяжением):

$$\sigma = \frac{E_{\text{пов}}}{S}.$$

3. Силы поверхностного натяжения направлены по касательной к свободной поверхности жидкости и стремятся сократить эту поверхность до минимума.

4. Поверхностное натяжение численно равно отношению модуля силы поверхностного натяжения, действующей на прямолинейный участок границы поверхностного слоя жидкости, к длине этого участка:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l}.$$

5. Высота подъёма (опускания) жидкости в капилляре зависит от поверхностного натяжения жидкости, плотности жидкости и внутреннего радиуса капилляра:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$



1. Какими особенностями строения жидкостей определяются их свойства?
2. Каковы особенности поверхностного слоя жидкостей?
3. Как определяют поверхностное натяжение жидкости?
4. Чем вызвано искривление поверхности жидкости вблизи стенок сосуда?
5. Почему капля воды или масла растекается по поверхности дерева, а капля ртути не растекается?
6. Что понимают под капиллярными явлениями? От чего зависит высота подъёма (опускания) жидкости в капиллярах?
7. Весной землю пахут и боронуют. Объясните, почему это способствует сохранению влаги в почве.

Пример решения задачи

Тонкостенное кольцо массой $m = 8,0$ г и радиусом $r = 10$ см соприкасается с мыльным раствором (рис. 45, а). Кольцо изготовлено из материала, хорошо смачиваемого мыльным раствором. Определите модуль силы, с которой надо подействовать на кольцо, чтобы оторвать его от поверхности раствора (рис. 45, б). Поверхностное натяжение мыльного раствора $\sigma = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

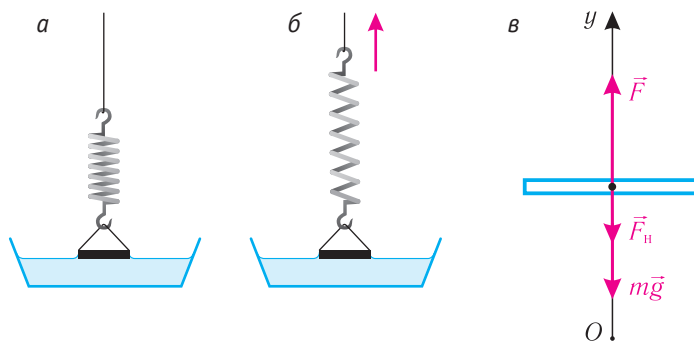


Рис. 45

Дано:

$$m = 8,0 \text{ г} = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$r = 10 \text{ см} = 0,10 \text{ м}$$

$$\sigma = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

$F = ?$

Решение. В момент отрыва от поверхности раствора на кольцо действуют искомая сила $\vec{F}$, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила поверхностного натяжения $\vec{F}_n$ (рис. 45, в). «Разрежем» поверхность жидкой плёнки, тянущейся от раствора к кольцу, воображаемой горизонтальной поверхностью. Нижняя часть плёнки граничит с верхней по кольцу, ограниченному двумя окружностями — внутренней и внешней, общая длина которых близка к $4\pi r$. Модуль силы поверхностного натяжения определим по формуле

$$F_n = 4\pi r \sigma.$$

Условие равновесия кольца в проекции на ось Oy в момент его отрыва от раствора, как видно из рисунка 45, в, имеет вид

$$F = mg + F_n \text{ или } F = mg + 4\pi r \sigma.$$

$$F = 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} + 4 \cdot 3,14 \cdot 0,10 \text{ м} \cdot 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 0,13 \text{ Н}.$$

Ответ: $F = 0,13 \text{ Н}$.

Упражнение 5

1. Почему перед окраской поверхность предварительно грунтуют — покрывают олифой?

2. Почему при пайке оловом или оловянным припоем поверхность металла тщательно зачищают?

3. Проволочная рамка с подвижной пере­кладкой затянута мыльной плёнкой. Опре­делите модуль силы, действующей со сторо­ны мыльной плёнки на пере­кладку длиной $l = 15$ см. Какую работу, преодолевая силы по­верхностного натяжения, нужно совершить, чтобы переместить пере­кладку на рассто­яние $d = 8,0$ см (рис. 46)? Поверхностное на­

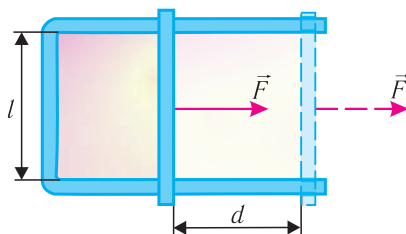


Рис. 46

тяжение мыльного раствора $\sigma = 4,0 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

4. Можно ли положить стальную иглку длиной $l = 3,5$ см и мас­сой $m = 0,10$ г на поверхность воды так, чтобы она не утонула? Поверхност­ное натяжение воды $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

5. Определите модуль силы, дополнительно действующей на чувстви­тельные весы из-за того, что вода смачивает проволочку диаметром $d = 0,12$ мм, подвешенную вертикально к чашке весов и частично погружённую в сосуд с водой. Поверхностное натяжение воды $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

6. Из пипетки, диаметр отверстия которой $d = 1,8$ мм, вытекло $N = 24$ кап­ли воды. Определите объём воды, вытекшей из пипетки. Поверхностное натя­жение воды $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$.

§ 8. Испарение и конденсация. Насыщенный пар. Влажность воздуха

Из повседневного опыта мы знаем, что жидкости, например вода, находясь в открытых сосудах, с течением времени переходят в газооб­разное состояние — испаряются. Причём скорость испарения зависит от рода жидкости, её температуры, площади свободной поверхности и

от притока воздуха. Вследствие испарения воды с поверхности водяной оболочки Земли — гидросферы, с поверхности почвы и растительного покрова в воздухе всегда находятся водяные пары, которые могут конденсироваться, образовывать облака, выпадают в виде осадков. Процессы испарения и конденсации распространены в природе и технике, и изучение их особенностей имеет большое практическое значение.

Испарение и конденсация. Рассмотрим сосуд, который частично заполнили водой и плотно закрыли. В сосуде одновременно протекают два противоположно направленных процесса — переход воды в газообразное состояние (испарение) и переход водяного пара в жидкость (конденсация) (рис. 47). В течение некоторого промежутка времени после герметизации сосуда испарение жидкости преобладает над конденсацией её пара. Если энергия к системе жидкость—пар не поступает из окружающей среды, то при испарении жидкость охлаждается. Это происходит вследствие того, что поверхностный слой жидкости покидают молекулы, обладающие наибольшей скоростью и, соответственно, кинетической энергией теплового движения, что позволяет им преодолеть силы притяжения, действующие в жидкости. Скорость вылетающих из жидкости молекул уменьшается, а скорость молекул, влетающих в жидкость, наоборот, увеличивается. Такие изменения скорости, а значит, и кинетической энергии молекул, пересекающих поверхность жидкости, позволяют системе достичь состояния теплового равновесия, при котором температуры жидкости и её пара одинаковы.

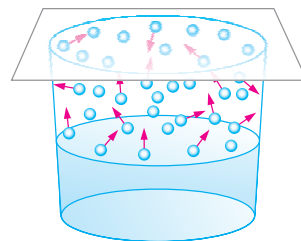


Рис. 47

Концентрация молекул пара возрастает до тех пор, пока число молекул, покидающих жидкость, не станет равным числу молекул, возвращающихся в неё, за тот же промежуток времени. В этом случае говорят, что между жидкостью и паром устанавливается состояние *динамического равновесия*. Оно будет существовать до тех пор, пока не изменится температура или объём системы.



Воздушная оболочка Земли — атмосфера — представляет собой смесь газов. Атмосферный воздух всегда содержит водяной пар, концентрация молекул которого у поверхности Земли колеблется от 3 % в тропиках до $2 \cdot 10^{-5}$ % в Антарктиде. Из океанов, морей и рек, а также суши за год испаряется свыше $5 \cdot 10^{14}$ м³ воды, что приблизительно равно объёму воды в Чёрном море. На испарение затрачивается около половины всей поглощённой поверхностью Земли энергии солнечного излучения. При конденсации пара количество теплоты, ранее потребовавшееся для испарения жидкости,

выделяется в атмосферу. Это приводит к нагреванию атмосферы и предотвращает резкие колебания температуры. При перемещении водяных паров в атмосфере на большие расстояния происходит их конденсация в областях с более низкой температурой. Таким образом, в одних областях поверхности и атмосферы Земли преобладают процессы испарения воды, а в других — процессы конденсации водяного пара.

Насыщенный пар. Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью, называют *насыщенным*. Насыщенный пар обладает свойствами, отличающимися от свойств идеального газа. Во-первых, давление насыщенного пара не зависит от его объёма при постоянной температуре. Количество молекул, переходящих из жидкости в пар через единичную площадку за единичный промежуток времени, зависит только от температуры и является постоянной величиной. Количество молекул, переходящих из пара в жидкость, зависит от концентрации пара, а значит, от его давления. Поэтому сразу при уменьшении объёма пара его давление увеличивается, что тут же приводит к возрастанию количества молекул, переходящих в жидкость. В результате количество молекул пара уменьшается и спустя некоторый промежуток времени устанавливается прежнее давление. При увеличении объёма пара его давление, наоборот, уменьшается. Вместе с этим уменьшается и количество молекул, переходящих из пара в жидкость. В результате количество молекул, которые покидают поверхность жидкости (оно не изменяется при $T = \text{const}$), превышает количество молекул, возвращающихся в жидкость. Равновесие опять восстанавливается при достижении первоначального значения давления.

Второе отличительное свойство насыщенного пара связано с зависимостью его давления от температуры. Давление p_n насыщенного пара возрастает значительно быстрее, чем давление $p_{и.г}$ идеального газа при увеличении температуры. В случае идеального газа рост давления обусловлен только увеличением его температуры ($p = nkT$, $V = \text{const}$). В случае же насыщенного пара рост температуры приводит к увеличению числа молекул, переходящих из жидкости в пар, т. е. к росту концентрации молекул пара. В соответствии с формулой $p = nkT$ давление пара увеличивается не только в результате непосредственного повышения температуры, но и в результате увеличения концентрации молекул пара, вызванного всё тем же повышением температуры.

При переходе из одного состояния в другое масса насыщенного пара изменяется. Поэтому законы идеального газа для изопроцессов можно применять к пару только в том случае, если он далёк от насыщения и его масса остаётся неизменной. Однако уравнение Клапейрона—Менделеева $pV = \frac{m}{M}RT$ можно использовать для нахождения любых параметров (p , V , T , m , ρ) насыщенного пара.

Давление (плотность) насыщенного пара при данной температуре — максимальное давление (плотность), которое может иметь пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью при этой температуре. Пар, давление (плотность) которого меньше давления (плотности) насыщенного пара при той же температуре, называют *ненасыщенным паром*.

Влажность воздуха. Воздух, содержащий водяной пар, называют *влажным воздухом*. Основными количественными характеристиками такого воздуха являются его абсолютная и относительная влажности.

Абсолютной влажностью ρ_n воздуха называют физическую величину, равную плотности водяного пара, находящегося в воздухе при данных условиях. Обычно абсолютную влажность выражают в граммах на кубический метр $\left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3}\right)$.

Используя уравнение Клапейрона—Менделеева, плотность пара можно определить через его парциальное давление p_n :

$$\rho_n = \frac{p_n M}{RT}, \quad (8.1)$$

где $M = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$ — молярная масса воды, T — температура воздуха.

Зная только плотность ρ_n или парциальное давление p_n пара, нельзя судить о том, в каком состоянии находится пар в данных условиях и насколько он далёк от насыщения. Вот почему вводят вторую характеристику влажности воздуха — *относительную влажность ϕ* . Относительная влажность показывает, насколько водяной пар при данной температуре далёк от насыщения.

Относительной влажностью ϕ воздуха называют физическую величину, равную отношению абсолютной влажности ρ_n к плотности ρ_n насыщенного водяного пара при данной температуре. Обычно относительную влажность выражают в процентах:

$$\phi = \frac{\rho_n}{\rho_n} \cdot 100 \%. \quad (8.2)$$

Поскольку плотность пара и его парциальное давление связаны соотношением (8.1), то относительную влажность можно определить как отношение парциального давления p_n водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре, к давлению p_n насыщенного пара при той же температуре:

$$\phi = \frac{p_n}{p_n} \cdot 100 \%. \quad (8.3)$$

Таким образом, относительная влажность определяется не только абсолютной влажностью, но и температурой воздуха. Значения давления p_n и плотности ρ_n насыщенного водяного пара при различных температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{кПа}$	$\rho_n, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_n, \text{кПа}$	$\rho_n, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
–20	0,103	0,85	6	0,934	7,3
–18	0,125	1,05	8	1,06	8,3
–16	0,151	1,27	10	1,228	9,4
–14	0,181	1,51	12	1,402	10,7
–12	0,217	1,80	14	1,598	12,1
–10	0,260	2,14	16	1,817	13,6
–8	0,337	2,54	18	2,063	15,4
–6	0,368	2,99	20	2,338	17,3
–4	0,437	3,51	22	2,643	19,4
–2	0,517	4,13	24	2,984	21,8
0	0,611	4,84	26	3,361	24,4
2	0,705	5,60	28	3,780	27,2
4	0,813	6,40	30	4,242	30,3

Когда парциальное давление водяного пара в воздухе равно давлению насыщенного пара при той же температуре, говорят, что воздух насыщен водяными парами. Если же плотность водяного пара превышает плотность насыщенного пара, то пар в воздухе считают *пересыщенным*. Такое состояние является неустойчивым и заканчивается конденсацией.

Температуру, при которой водяной пар в результате изобарного охлаждения становится насыщенным, называют *точкой росы*. При понижении температуры ниже точки росы происходит конденсация водяного пара. Например, днём температура воздуха была $t_1 = 26 ^\circ\text{C}$, а плотность водяного пара $\rho_n = 24,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Ночью температура понизилась до $t_2 = 16 ^\circ\text{C}$. При этой температуре плотность насыщенного водяного пара $\rho_n = 13,6 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Значит, избыток пара сконденси-

руется и выпадет в виде росы. Этот процесс является причиной образования тумана, облаков и дождя. В технике конденсация обычно осуществляется на охлаждаемых поверхностях.

Если относительная влажность меньше 100 %, то температура, соответствующая точке росы, всегда ниже температуры воздуха, и тем ниже, чем меньше относительная влажность.

Приборы для измерения влажности. Относительную влажность воздуха обычно измеряют психрометром (рис. 48). Психрометр состоит из двух термометров — сухого и влажного. Сухой термометр показывает температуру воздуха. Резервуар влажного термометра обёрнут полоской ткани, конец которой опущен в воду. Вода с ткани испаряется, в результате чего термометр охлаждается. Чем меньше относительная влажность воздуха, тем более интенсивно идёт процесс испарения воды из ткани и тем сильнее охлаждается влажный термометр. И наоборот — при большой относительной влажности влажный термометр охлаждается незначительно. Если относительная влажность $\phi = 100 \%$, вода и её пар находятся в динамическом равновесии, и показания обоих термометров совпадают. Зная показания сухого и влажного термометров, относительную влажность воздуха определяют, используя специальную таблицу, называемую психрометрической (таблица 2).



Рис. 48

Живые организмы и растения весьма восприимчивы к относительной влажности воздуха. При температуре 20—25 °С наиболее благоприятная для человека относительная влажность составляет 40—60 %. При высокой влажности, особенно в жаркий день, испарение влаги с поверхности кожи затрудняется, что приводит к нарушению важнейших биологических механизмов регулирования температуры тела. При низкой влажности происходит интенсивное испарение с поверхности тела и высыхание слизистой оболочки носа, гортани, лёгких, что приводит к ухудшению самочувствия. При низкой влажности в воздухе дольше сохраняются патогенные микроорганизмы, что также небезопасно для человека. В случае низкой влажности воздуха интенсивность испарения с листьев увеличивается, и при малом запасе влаги в почве они быстро вянут и засыхают. Влажность воздуха нужно учитывать и в различных технологических процессах, таких, например, как сушка и хранение готовых изделий. Стальные изделия при высокой влажности быстро ржавеют. Сохранение произведений искусства и книг также требует поддержания влажности воздуха на необходимом уровне.

Большое значение имеет влажность в метеорологии для предсказания погоды. Если воздух у поверхности Земли охлаждается ниже точки росы, то могут образовываться туман, облака, роса или иней.

Таблица 2 — Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °C	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39



1. Давление насыщенного пара при постоянной температуре не зависит от его объёма.

2. Давление насыщенного пара зависит от температуры пара и концентрации его молекул:

$$p = nkT.$$

3. Абсолютной влажностью воздуха называют физическую величину, равную плотности водяного пара, находящегося в воздухе при данных условиях.

4. Относительной влажностью воздуха называют физическую величину, равную отношению абсолютной влажности к плотности насыщенного водяного пара при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100\%.$$

?

1. Какой пар называют насыщенным? Какие физические процессы обуславливают состояние динамического равновесия между жидкостью и её паром?
2. Какие свойства насыщенного пара отличают его от идеального газа?
3. Что называют абсолютной и относительной влажностью воздуха? В каких единицах их измеряют?
4. Что называют точкой росы?
5. Как можно найти относительную влажность воздуха, если известны его температура и точка росы?
6. Как изменяются абсолютная и относительная влажность воздуха при его нагревании?
7. На каких физических явлениях основано действие психрометра?
8. Можно ли, используя психрометр, определить относительную влажность воздуха, температура которого ниже 0 °С?

Примеры решения задач

Пример 1. Вечером при температуре $t_1 = 20$ °С относительная влажность воздуха $\varphi_1 = 60$ %. Выпадет ли роса, если ночью температура понизится до $t_2 = 12$ °С?

Дано:
 $t_1 = 20$ °С
 $t_2 = 12$ °С
 $\varphi_1 = 60$ %

Выпадет ли роса?

Решение. Для того чтобы узнать, выпадет ли роса при понижении температуры воздуха до $t_2 = 12$ °С, необходимо сравнить плотность (давление) насыщенного пара при этой температуре с плотностью (парциальным давлением) пара при температуре $t_1 = 20$ °С. При температуре $t_2 = 12$ °С плотность насыщенного водяного пара $\rho_{\text{н}2} = 10,7 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (см. таблицу 1 § 8).

Плотность водяного пара, содержащегося в воздухе при температуре $t_1 = 20$ °С,

можно найти из формулы $\varphi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{\text{н}1}} \cdot 100\%$, где $\rho_{\text{н}1} = 17,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (см. таблицу 1 § 8):

$$\rho_1 = \frac{\varphi_1 \rho_{\text{н}1}}{100\%} = \frac{60\% \cdot 17,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}}{100\%} = 10,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Поскольку $\rho_1 < \rho_{н2} \left(10,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} < 10,7 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right)$, то имеющегося в воздухе количества водяного пара недостаточно для насыщения, роса не выпадет.

Ответ: роса не выпадет.

Пример 2. В помещении вместимостью $V = 1,0 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ при температуре $t_1 = 10^\circ\text{C}$ относительная влажность воздуха $\phi_1 = 40\%$. Определите массу воды, которую надо испарить в помещении, чтобы при температуре $t_2 = 18^\circ\text{C}$ относительная влажность воздуха повысилась до $\phi_2 = 60\%$.

Дано:
 $V = 1,0 \cdot 10^3 \text{ м}^3$
 $t_1 = 10^\circ\text{C}$
 $\phi_1 = 0,40$
 $t_2 = 18^\circ\text{C}$
 $\phi_2 = 0,60$
 $\Delta m \text{ — ?}$

Решение. При температуре $t_1 = 10^\circ\text{C}$ в воздухе помещения содержится водяной пар массой $m_1 = \phi_1 \rho_{н1} V$, где $\rho_{н1} = 9,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (см. таблицу 1 § 8). Масса водяного пара в данном объёме воздуха при температуре t_2 : $m_2 = \phi_2 \rho_{н2} V$, где $\rho_{н2} = 15,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (см. таблицу 1 § 8). Тогда $\Delta m = m_2 - m_1$ или

$$\Delta m = \phi_2 \rho_{н2} V - \phi_1 \rho_{н1} V = (\phi_2 \rho_{н2} - \phi_1 \rho_{н1}) V.$$

$$\Delta m = (0,60 \cdot 15,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} - 0,40 \cdot 9,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}) \cdot 1,0 \cdot 10^3 \text{ м}^3 = 5,5 \text{ кг}.$$

Ответ: $\Delta m = 5,5 \text{ кг}$.

Упражнение 6

1. При температуре $t = 16^\circ\text{C}$ парциальное давление водяного пара в воздухе $p_{\text{п}} = 1,2 \text{ кПа}$. Определите относительную влажность воздуха.

2. Определите относительную влажность воздуха в помещении вместимостью $V = 200 \text{ м}^3$ при температуре $t = 20^\circ\text{C}$, если масса водяного пара в помещении $m = 2,4 \text{ кг}$.

3. При температуре $t = 18^\circ\text{C}$ относительная влажность воздуха $\phi = 61\%$. При какой температуре начнёт выпадать роса?

4. При температуре $t = 28^\circ\text{C}$ относительная влажность воздуха $\phi = 50\%$. Определите массу росы, выпавшей из воздуха объёмом $V = 1,0 \text{ км}^3$, при понижении температуры на $\Delta T = 16 \text{ К}$.

5. Определите относительную и абсолютную влажности воздуха, если показание сухого термометра психрометра $t_{\text{с}} = 14^\circ\text{C}$, а показание влажного — $t_{\text{в}} = 10^\circ\text{C}$.

6. При температуре $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ относительная влажность воздуха $\varphi = 44\%$. Определите показание влажного термометра психрометра.

7. Воздух объёмом $V_1 = 2,0\text{ м}^3$, относительная влажность которого $\varphi_1 = 20\%$, смешали с воздухом при той же температуре, объём и относительная влажность которого соответственно $V_2 = 3,0\text{ м}^3$ и $\varphi_2 = 30\%$. Определите относительную влажность смеси, если её объём $V_3 = 5,0\text{ м}^3$.

8*. В сосуде находится воздух при температуре $t_1 = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность которого $\varphi_1 = 60\%$. Определите относительную влажность воздуха после уменьшения его объёма в три раза и нагревания до температуры $t_2 = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой давление насыщенного пара $p_{\text{н}2} = 1,013 \cdot 10^5\text{ Па}$.

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 9. Термодинамическая система.

Термодинамическое равновесие. Внутренняя энергия. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

В 9 классе вы узнали, что полная энергия физической системы представляет собой сумму её механической энергии и внутренних энергий тел, образующих систему. Причём изменение механической энергии в ряде случаев происходит в результате перехода её части во внутреннюю энергию тел системы. Режущие инструменты заметно нагреваются при заточке их на точильном камне. При скольжении конькобежца по льду под коньками тает лёд, что обеспечивает хорошее скольжение. В этих примерах тела при трении нагреваются, и интенсивность хаотического движения молекул возрастает, что приводит к увеличению внутренней энергии тел. Как же определить внутреннюю энергию термодинамической системы? И что понимают под термодинамической системой?

Термодинамическая система. Термодинамическое равновесие. Выводы термодинамики основаны на фундаментальных законах, называемых началами термодинамики. Эти законы установлены в результате обобщения многочисленных экспериментальных фактов. Опираясь на них, термодинамика позволяет делать определённые выводы о свойствах исследуемых систем, которые подтверждаются экспериментально. Физические тела и их модели в термодинамике называют *термодинамическими системами*. Термодинамическую систему характеризуют набором параметров, определяющих её состояние. В отличие от молекулярно-кинетической теории в термодинамике не рассматривают микроскопическое строение тел и для их описания используют не физические характеристики молекул (микропараметры), а параметры системы (макропараметры), такие как давление, объём, температура.

Замкнутая, или же изолированная, термодинамическая система стремится к равновесию, когда все её макропараметры не изменяются с течением времени. Иначе говоря, *для каждой изолированной термодинамической системы существует состояние термодинамического равновесия, в которое она переходит самопроизвольно.*

Это утверждение называют нулевым началом термодинамики.

Внутренняя энергия. Говоря о полной энергии макроскопического тела, необходимо всегда учитывать не только его механическую энергию (кинетическую и потенциальную), но также кинетическую энергию теплового движения его частиц и потенциальную энергию их взаимодействия. В термодинамике под внутренней энергией тела понимают полную энергию, относящуюся к самим частицам, образующим тело. Это кинетическая энергия теплового движения молекул, кинетическая энергия движения атомов внутри молекул, потенциальная энергия взаимодействия между молекулами, энергия электронных оболочек атомов и внутриядерная энергия.

Внутренняя энергия любой термодинамической системы состоит из внутренних энергий тел, входящих в данную систему.

В термодинамике главную роль играет не сама внутренняя энергия, а её изменение, которое происходит при переходе системы из одного состояния в другое. Под приращением (изменением) внутренней энергии понимают разность внутренних энергий в конечном и начальном состояниях:

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

Например, переход некоторой массы идеального газа из состояния 1 в состояние 3 (рис. 49) можно осуществить или в ходе процесса $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ (при изохорном нагревании, а затем при изобарном расширении), или в ходе процесса $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ (при изобарном расширении, а затем при изохорном нагревании). Однако приращение (изменение) внутренней энергии газа и в одном и в другом случае будет одинаковым:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$

Внутренняя энергия является функцией состояния системы. Это означает, что **изменение внутренней энергии при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое зависит только лишь от значений параметров этих состояний, а не от процесса перехода.**

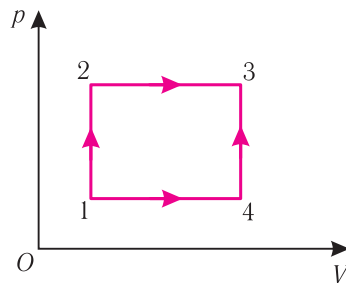


Рис. 49

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Определим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа, т. е. газа, состоящего из отдельных атомов. Например, к одноатомным газам относят инертные газы — гелий, неон, аргон и др.

Из определения понятия «идеальный газ» следует, что его внутренняя энергия является суммой кинетических энергий хаотического движения всех молекул или атомов (взаимодействие между частицами отсутствует). Следовательно, внутренняя энергия идеального одноатомного газа равна произведению средней кинетической энергии $\langle E_k \rangle$ теплового движения частиц на их число N , т. е. $U = N\langle E_k \rangle$. Поскольку $N = \frac{m}{M} N_A$, где m — масса газа, а $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$, то

$$U = \frac{m}{M} N_A \frac{3}{2} kT.$$

С учётом того, что $kN_A = R$, получим:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (9.1)$$

или

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Как видно из формулы (9.1), **внутренняя энергия данной массы идеального одноатомного газа пропорциональна абсолютной температуре газа.** Она не зависит от других макроскопических параметров состояния — давления и объёма. Следовательно, изменение внутренней энергии данной массы идеального одноатомного газа происходит только при изменении его температуры:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (9.2)$$

При определении внутренней энергии реальных газов, жидкостей и твёрдых тел необходимо учитывать потенциальную энергию взаимодействия частиц, которая зависит от расстояния между ними. Поэтому в общем случае внутренняя энергия макроскопических тел зависит не только от абсолютной температуры, но и от объёма.

При изучении физики в 8 классе вы узнали, что изменить состояние термодинамической системы можно двумя способами: используя теплопередачу и совершая работу. Процесс теплопередачи и совершение работы характеризуют соответственно физическими величинами — количеством теплоты Q и работой A , которые являются мерами изменения внутренней энергии системы.



1. Физические тела и их модели в термодинамике называют термодинамическими системами. Термодинамическую систему характеризуют набором макропараметров, определяющих её состояние.

2. Состояние изолированной термодинамической системы, когда все её макропараметры не изменяются с течением времени, называют равновесным.

3. Под внутренней энергией термодинамической системы понимают сумму кинетической энергии всех частиц системы и потенциальной энергии их взаимодействия.

4. Изменение внутренней энергии тела при переходе из одного состояния в другое зависит только лишь от значений параметров этих состояний, а не от процесса перехода.

5. Внутренняя энергия данной массы идеального одноатомного газа зависит только от температуры:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$



1. Что называют термодинамической системой?
2. Что понимают под термодинамическим равновесием?
3. От каких параметров зависят внутренняя энергия идеального газа и внутренняя энергия реальных газов?
4. Идеальный газ определённой массы переводят из состояния 1 в состояние 3 двумя различными способами: изотермически ($1 \rightarrow 3$) и осуществляя сначала изобарное расширение, а затем изохорное охлаждение ($1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$) (рис. 50). Зависит ли изменение внутренней энергии газа от способа его перевода из состояния 1 в состояние 3?
5. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию системы?
6. Какая физическая величина является мерой изменения внутренней энергии системы при теплопередаче?
7. Как соотносятся внутренние энергии газов, неона и гелия, взятых при одинаковой температуре в количестве 1 моль?

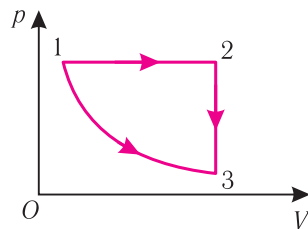


Рис. 50

Пример решения задачи

На рисунке 51 в координатах (p , V) изображён процесс перехода идеального одноатомного газа определённой массы из состояния 1 в состояние 2. Определите приращение внутренней энергии газа, если давление газа в конечном состоянии $p_0 = 1,5$ МПа, а его объём в начальном состоянии $V_0 = 2,0$ л.

Дано:

$$p_0 = 1,5 \text{ МПа} = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$V_0 = 2,0 \text{ л} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

ΔU — ?

Решение. Приращение внутренней энергии

идеального одноатомного газа $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$.

Найти массу m газа, его молярную массу M и изменение температуры ΔT не представляется

возможным. Однако, используя уравнение Клапейрона—Менделеева, для состояний 1 и 2 можно определить значение выраже-

ния $\frac{m}{M} R \Delta T$. Из рисунка 51 видно, что в состоянии 1 давление газа $2p_0$, а его объём V_0 , а в состоянии 2 — p_0 и $3V_0$. Тогда уравнение Клапейрона—Менделеева для состояний 1 и 2 примет вид:

$$2p_0 V_0 = \frac{m}{M} R T_1, \quad (1)$$

$$p_0 3V_0 = \frac{m}{M} R T_2. \quad (2)$$

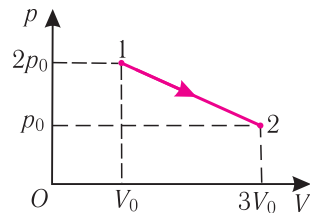


Рис. 51

Вычтем из уравнения (2) уравнение (1): $3p_0 V_0 - 2p_0 V_0 = \frac{m}{M} R (T_2 - T_1)$ и получим, что $p_0 V_0 = \frac{m}{M} R \Delta T$. Тогда $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{3}{2} p_0 V_0$.

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 4,5 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 4,5 \text{ кДж}.$$

Ответ: $\Delta U = 4,5 \text{ кДж}$.

Упражнение 7

1. Определите внутреннюю энергию аргона массой $m = 4,0 \text{ г}$ при температуре $t = 27^\circ \text{C}$.

2. Определите приращение внутренней энергии идеального одноатомного газа, количество вещества которого $\nu = 2,0 \text{ моль}$, при его нагревании на $\Delta t = 20^\circ \text{C}$.

3. Идеальный одноатомный газ занимает объём $V = 4,0 \text{ л}$, его давление $p = 0,30 \text{ МПа}$. Определите внутреннюю энергию газа.

4. При изменении состояния идеального одноатомного газа его объём увеличился в $\alpha = 2,4$ раза, а давление уменьшилось в $\beta = 1,2$ раза. Определите отношение внутренних энергий газа в конечном и начальном состояниях.

5. Масса гелия $m = 2,0 \text{ кг}$, его давление $p = 60 \text{ кПа}$. Определите внутреннюю энергию гелия, если его плотность $\rho = 0,20 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

6. При температуре $t = 27^\circ\text{C}$ внутренняя энергия идеального одноатомного газа $U = 1,2$ Дж. Определите число атомов газа.

7*. Идеальный одноатомный газ переходит из одного состояния в другое так, что его давление изменяется по закону $p = AT^2$, где A — коэффициент пропорциональности. При увеличении объёма газа в три раза приращение его внутренней энергии $\Delta U = U_2 - U_1 = -0,60$ кДж. Определите первоначальное давление газа, если его объём в начальном состоянии $V_1 = 4,0$ л.

§ 10. Работа в термодинамике. Количество теплоты

В 9 классе вы узнали, что работа силы (механическая работа) связана с превращением одного вида энергии в другой, например, механической энергии во внутреннюю. Работу силы рассматривают как меру изменения энергии физической системы. А как определить работу в термодинамике? Как может быть выражена эта работа через макроскопические параметры — давление и объём?

Рассмотрим газ, находящийся в цилиндрическом сосуде с площадью основания S , закрытом подвижным поршнем (рис. 52). Взаимодействие газа с поршнем, а также со стенками сосуда можно характеризовать давлением p , которое газ оказывает на них. Допустим, что в результате изобарного расширения газа поршень переместился из положения 1 в положение 2 на расстояние Δl .

Модуль силы давления газа, действующей на поршень, $F = pS$. Эта сила совершает работу по перемещению поршня

$$A_{12} = F\Delta l \cos \alpha, \quad (10.1)$$

где α — угол между направлениями силы и перемещения. В рассматриваемом примере $\alpha = 0$, тогда

$$A_{12} = pS\Delta l.$$

Произведение $S\Delta l$ определяет приращение объёма $\Delta V = V_2 - V_1$ (см. рис. 52), поэтому работа газа при его изобарном расширении

$$A_{12} = p\Delta V = p(V_2 - V_1), \quad (10.2)$$

где V_1 — начальный объём газа, V_2 — объём газа в конечном состоянии.

Так как давление p газа всегда величина положительная, из формулы (10.2) следует, что, если газ расширяется ($V_2 > V_1$), работа, совершённая

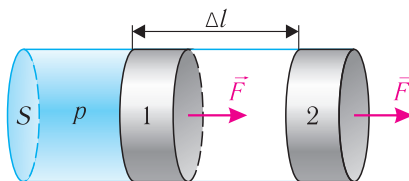


Рис. 52

силой давления газа, положительная ($A_{12} > 0$), а в случае сжатия ($V_2 < V_1$) работа отрицательная ($A_{12} < 0$).

Процесс медленного изобарного сжатия газа из состояния 2 с начальным объёмом V_2 в состояние 1 с конечным объёмом V_1 можно характеризовать работой A'_{21} внешних сил над газом:

$$A'_{21} = p(V_2 - V_1). \quad (10.3)$$

Из сравнения равенств (10.2) и (10.3) вытекает соотношение между работой A'_{21} , совершённой внешними силами, и работой A_{12} , совершённой силой давления газа: $A'_{21} = A_{12}$. Это соотношение согласуется с третьим законом Ньютона (внешняя сила $\vec{F}$, действующая на газ со стороны поршня, имеет направление, противоположное силе давления $\vec{F}$, действующей на поршень со стороны газа). Из формулы (10.3) видно, что работа, совершённая внешними силами, положительная ($A' > 0$), если происходит сжатие газа ($V_{\text{нач}} > V_{\text{кон}}$). Если газ расширяется ($V_{\text{нач}} < V_{\text{кон}}$), то работа, совершённая внешними силами, отрицательная ($A' < 0$).

Геометрическое толкование работы. Построим график зависимости давления газа от его объёма при $p = \text{const}$. Как видно из рисунка 53, при изобарном расширении газа работа, совершённая силой давления газа, численно равна площади прямоугольника V_1ABV_2 .

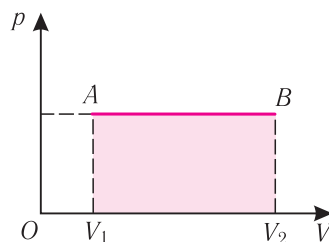


Рис. 53

Если процесс перехода газа из начального состояния в конечное не является изобарным, то работа, совершённая силой давления газа при изменении его объёма от V_1 до V_2 , численно равна площади фигуры, ограниченной графиком процесса (кривая 1—2), осью OV и прямыми, соответствующими значениям объёмов V_1 и V_2 (рис. 54).

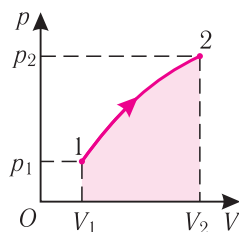


Рис. 54

Процесс, при котором термодинамическая система, прошедшая некоторую последовательность состояний, снова возвращается в исходное состояние, называют *циклическим процессом* или *циклом* (рис. 55). Работа, совершаемая системой при циклическом процессе, или работа цикла, равна площади фигуры, ограниченной линиями, которые изображают цикл:

$$A = A_{12} + A_{23} + A_{31} = S_{12} + S_{23} + S_{31} = S_{12} + S_{31} = S_{1231},$$

где $S_{23} = 0$, $S_{1231} > 0$ на рисунке 55, а и $S_{1231} < 0$ на рисунке 55, б.

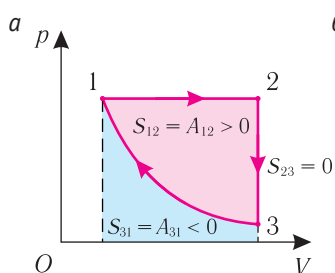


Рис. 55

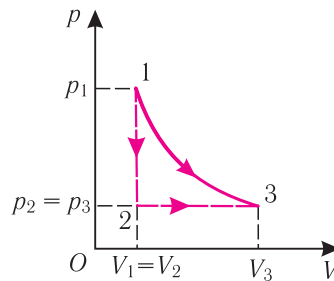
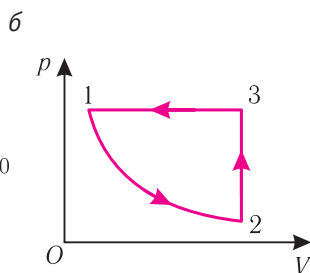


Рис. 56

Если «кривая расширения» (изобара $1 \rightarrow 2$) (см. рис. 55, а) расположена выше «кривой сжатия» (изотерма $3 \rightarrow 1$), то полная работа, совершённая системой за цикл (работа цикла), положительная. Если же, как изображено на рисунке 55, б, «кривая сжатия» (изобара $3 \rightarrow 1$) расположена выше «кривой расширения» (изотерма $1 \rightarrow 2$), то работа цикла отрицательная.

Из рисунка 56 видно, что численное значение работы цикла определяется не только начальным и конечным состояниями системы, но и видом процесса. Например, газ из состояния 1 можно перевести в состояние 3 либо в результате изотермического расширения, либо сначала изохорно понизив его давление до значения p_2 , а затем изобарно увеличив его объём от значения V_1 до значения V_3 .

Как видно из рисунка 56, в первом случае работа, совершённая силами давления газа, больше, чем во втором. Следовательно, **работа, совершаемая при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое, зависит не только от начального и конечного состояний системы, но и от вида процесса.**

Количество теплоты и удельная теплоёмкость. Итак, существуют два способа передачи энергии от одного тела к другому. Первый характеризуется передачей энергии в процессе механического взаимодействия тел — механическая энергия одного тела переходит в энергию хаотического движения частиц вещества другого тела или, наоборот, убыль энергии хаотического движения частиц вещества одного тела сказывается на увеличении механической энергии другого тела. Такую форму передачи энергии в термодинамике (как и в механике) называют работой. Так, например, в рассмотренной нами ранее термодинамической системе (газ в цилиндрическом сосуде под поршнем) расширение газа приводит к перемещению поршня. При этом убыль внутренней энергии газа равна работе, совершённой силой давления газа, под действием которой поршень переместился.

Второй способ передачи энергии осуществляется при непосредственном обмене энергией между хаотически движущимися частицами взаимодействующих тел. За счёт переданной при этом энергии увеличивается внутренняя энергия одного тела и уменьшается внутренняя энергия другого. Если, например, привести в соприкосновение два тела с разными температурами, то частицы более нагретого тела будут передавать часть своей энергии частицам более холодного тела. В результате внутренняя энергия первого тела уменьшается, а второго тела увеличивается. Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называют *теплопередачей*. Как вы уже знаете, существуют три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и излучение.

Количественной мерой энергии, переданной телу в процессе теплопередачи, является количество теплоты Q . В СИ единицей количества теплоты является джоуль (Дж). Иногда для измерения количества теплоты используют внесистемную единицу — калорию ($1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$).

Если процесс теплопередачи не сопровождается изменением агрегатного состояния вещества, то

$$Q = cm(T_2 - T_1), \quad (10.4)$$

где m — масса тела, $T_2 - T_1 = \Delta T$ — разность температур в конце и в начале процесса теплопередачи, c — *удельная теплоёмкость вещества* — физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое получает или отдаёт вещество массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К. Удельную теплоёмкость измеряют в джоулях, делённых на килограмм, кельвин $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$.



Физическая величина, равная произведению массы тела на удельную теплоёмкость вещества, носит название теплоёмкости тела. Обозначают теплоёмкость тела C и из-

меряют в джоулях на кельвин $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right)$: $C = cm$. Теплоёмкость, в отличие от удельной теплоёмкости, является тепловой характеристикой тела, а не вещества.

Удельная теплота плавления. Физическую величину, численно равную количеству теплоты, необходимому для превращения кристаллического вещества массой 1 кг, взятого при температуре плавления, в жидкость той же температуры, называют *удельной теплотой плавления* λ . Для плавления тела массой m , предварительно нагретого до температуры плавления, ему необходимо сообщить количество теплоты $Q_{\text{пл}} = \lambda m$. При кристаллизации тела выделяется количество теплоты $Q_{\text{кр}} = -\lambda m$.

Удельная теплота парообразования. Физическую величину, численно равную количеству теплоты, которое необходимо передать жидкости массой 1 кг, находящейся при температуре кипения, для превращения её при постоянной температуре в пар, называют *удельной теплотой парообразования* L . Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости массой m , предварительно нагретой до температуры кипения, в пар, определяют по формуле $Q_{\text{п}} = Lm$. Конденсация пара сопровождается выделением количества теплоты $Q_{\text{к}} = -Lm$.

Удельная теплота сгорания топлива. Физическую величину, численно равную количеству теплоты, выделяющемуся при полном сгорании топлива массой 1 кг, называют *удельной теплотой сгорания* топлива q . Количество теплоты, выделившееся при полном сгорании некоторой массы m топлива, определяют по формуле $Q_{\text{сг}} = qm$. Оно передаётся телам, образующим термодинамическую систему, и по отношению к ним является положительной величиной.

Отметим, что в результате теплопередачи могут изменяться как обе составляющие внутренней энергии тела, так и одна из них. При нагревании (охлаждении) изменяются кинетическая энергия хаотического движения частиц, которые составляют тело, и потенциальная энергия их взаимодействия. При плавлении (кристаллизации), кипении (конденсации) изменяется только потенциальная энергия взаимодействия частиц вещества.

При совершении работы также может изменяться как кинетическая, так и потенциальная энергия частиц вещества. Следовательно, как при теплопередаче, так и при совершении работы происходит изменение кинетической и потенциальной энергий частиц вещества, что приводит к изменению внутренней энергии тела.



1. Работу газа при изобарном процессе выражают через макроскопические параметры термодинамической системы:

$$A = p\Delta V.$$

2. Работа газа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости давления от объёма, осью OV и прямыми, соответствующими значениям объёмов V_1 и V_2 .

3. Работа, совершаемая при переходе системы из одного состояния в другое, зависит не только от начального и конечного состояний, но и от вида процесса.

4. Процесс передачи энергии от одного тела к другому без совершения работы называют теплопередачей.

?

1. Как вычислить работу, совершаемую силой давления газа при его расширении (сжатии)? Как соотносятся между собой работа силы давления газа и работа, которую совершают внешние силы над газом?
2. В чём заключается геометрический смысл понятия «работа» в термодинамике?
3. Почему расширение газа при отсутствии теплообмена с окружающей средой сопровождается его охлаждением?
4. Какая физическая величина является мерой изменения внутренней энергии при теплопередаче?
5. Объясните, почему при теплопередаче и совершении работы изменяется внутренняя энергия тела.

Примеры решения задач

Пример 1. Определите работу, совершаемую силой давления идеального газа определённой массы при изобарном повышении его температуры от $t_1 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = 87\text{ }^{\circ}\text{C}$, если давление газа и его начальный объём соответственно $p = 190\text{ кПа}$ и $V_1 = 6,0\text{ дм}^3$.

Дано:

$$T_1 = 285\text{ К}$$

$$T_2 = 360\text{ К}$$

$$p = 190\text{ кПа} = 1,90 \cdot 10^5\text{ Па}$$

$$V_1 = 6,0\text{ дм}^3 = 6,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$$

$A = ?$

Решение. Сила давления газа совершает положительную работу, поскольку при изобарном нагревании увеличивается его объём. Поэтому $A = p(V_2 - V_1) = pV_2 - pV_1$. Согласно уравнению Клапейрона—Менделеева $pV_1 = \nu RT_1$ и $pV_2 = \nu RT_2$. Следовательно,

$$A = p(V_2 - V_1) = \nu R(T_2 - T_1) = \nu RT_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = pV_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right).$$

$$A = 1,90 \cdot 10^5\text{ Па} \cdot 6,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3 \cdot \left(\frac{360\text{ К}}{285\text{ К}} - 1 \right) = 3,0 \cdot 10^2\text{ Дж} = 0,30\text{ кДж}.$$

Ответ: $A = 0,30\text{ кДж}$.

Пример 2. Состояние идеального газа, взятого в количестве $\nu = 1,0$ моль при температуре $T_1 = 300\text{ К}$, изменяется так, как показано на рисунке 57. Определите работу газа в ходе всего процесса, если на изохоре $1 \rightarrow 2$ его давление уменьшается в три раза, а точки 1 и 3 лежат на одной изотерме.

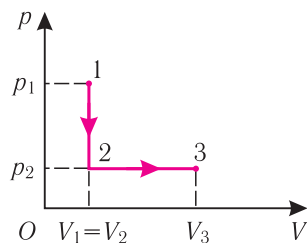


Рис. 57

Дано:

$\nu = 1,0 \text{ моль}$

$T_1 = 300 \text{ К}$

$p_1 = 3p_2$

$T_1 = T_3$

 $A = ?$

Решение. Работа A газа в ходе всего процесса равна сумме работ на участках $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$. Так как при переходе из состояния 1 в состояние 2 объём газа не меняется (процесс изохорный $V_2 = V_1$), то работа газа $A_{12} = 0$. Давление газа при переходе из состояния 2 в состояние 3 остаётся постоянным ($p_2 = p_3$), следовательно, работа газа $A_{23} = p_2(V_3 - V_1)$. Тогда $A = A_{12} + A_{23} = p_2(V_3 - V_1)$.

Так как по условию $T_1 = T_3$, то воспользуемся уравнением Клапейрона (5.2):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_3}{T_3}, \text{ откуда } V_3 = \frac{p_1}{p_2} V_1 = 3V_1. \text{ Следовательно, } A = p_2(3V_1 - V_1) = 2p_2 V_1 = \frac{2p_1 V_1}{3}.$$

Согласно уравнению Клапейрона—Менделеева $p_1 V_1 = \nu R T_1$.

$$\text{Тогда } A = \frac{2}{3} \nu R T_1.$$

$$A = \frac{2 \cdot 1,0 \text{ моль} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}}{3} = 1662 \text{ Дж} = 1,7 \text{ кДж}.$$

Ответ: $A = 1,7 \text{ кДж}$.

Упражнение 8

1. Газ, давление которого $p = 0,10 \text{ МПа}$, изобарно расширяется. При этом сила давления газа совершает работу $A = 40 \text{ Дж}$. Определите, на сколько увеличился объём газа.

2. На рисунке 58 изображён график зависимости давления газа от объёма. Определите работу, совершённую силой давления газа при расширении.

3. При изобарном увеличении температуры азота на $\Delta T = 180 \text{ К}$ силой его давления совершена работа $A = 25 \text{ кДж}$. Определите массу азота.

4. Идеальный газ определённой массы при температуре $T_1 = 290 \text{ К}$ и давлении $p = 0,20 \text{ МПа}$ занимает объём $V_1 = 0,10 \text{ м}^3$. Определите работу, совершённую силой давления газа при его изобарном нагревании до температуры $T_2 = 370 \text{ К}$.

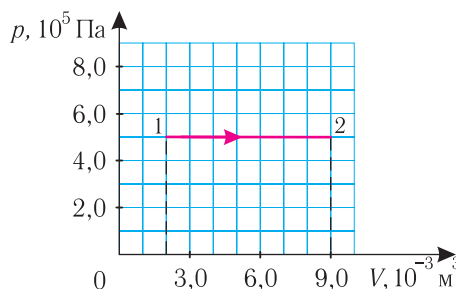


Рис. 58

5. На рисунке 59 изображён график расширения идеального газа, взятого в количестве $\nu = 1,0$ моль. Определите работу, совершённую силой давления газа при его переходе из состояния 1 в состояние 2.

6*. Гелий, взятый в количестве $\nu = 2,00$ моль, изобарно расширяется. При этом сила давления газа совершает работу $A = 7,20$ кДж. Определите начальную температуру гелия, если его масса не меняется, а концентрация молекул в конечном состоянии в три раза меньше, чем в начальном.

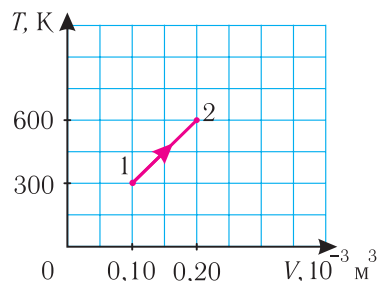


Рис. 59

§ 11. Первый закон термодинамики.

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам в идеальном газе. Адиабатный процесс

При изучении физики в 9 классе вы узнали, что полная механическая энергия замкнутой системы тел сохраняется только при отсутствии трения, а при наличии трения она уменьшается. Куда девается механическая энергия? Если бутылку, заполненную до половины водой при комнатной температуре, встряхивать в течение нескольких минут, то окажется, что вода нагрелась на 1—2 °С. Каким образом нагрелась вода?

В середине XIX века известный английский физик Дж. Джоуль (1818—1889), проведя многочисленные опыты, показал, что совершённая при перемешивании воды механическая работа практически равна увеличению её внутренней энергии. Опыты Джоуля, а также исследования немецкого врача и естествоиспытателя Р. Майера (1814—1878), немецкого профессора физиологии и одного из самых знаменитых физиков второй половины XIX века Г. Гельмгольца (1821—1894) позволили сформулировать закон сохранения и превращения энергии, распространив его на все явления природы. Согласно этому закону **при любых взаимодействиях материальных объектов энергия не исчезает и не возникает из ничего, она только передаётся от одних объектов к другим или превращается из одной формы в другую.**

Для термодинамических систем (в термодинамике обычно рассматривают макроскопически неподвижные системы) закон сохранения и превращения энергии называют *первым законом термодинамики*. Согласно первому закону термодинамики, **приращение внутренней энергии термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое равно алгебраической сумме работы, совершённой внешними силами, и количества теплоты, полученного или отданного системой при взаимодействии с внешними телами:**

$$\Delta U = A' + Q. \quad (11.1)$$

Поскольку работа внешних сил равна работе, совершаемой термодинамической системой, взятой с противоположным знаком ($A' = -A$), то первый закон термодинамики можно сформулировать иначе: **количество теплоты, полученное или отданное термодинамической системой при взаимодействии с внешними телами при её переходе из одного состояния в другое, идёт на приращение внутренней энергии системы и на работу, которую она совершает при расширении:**

$$Q = \Delta U + A. \quad (11.2)$$

Если система представляет собой действующее устройство, периодически возвращающееся в исходное состояние, то при этом $\Delta U = 0$ и $A = Q$. Механизм, который мог бы совершать работу без изменения состояния составляющих его тел и без теплопередачи от внешних тел, называют «вечным двигателем первого рода». Поэтому первый закон термодинамики можно сформулировать и следующим образом: *невозможен вечный двигатель первого рода*, т. е. такой двигатель, который при неизменном значении собственной внутренней энергии совершал бы работу большую, чем энергия, получаемая им извне.

Применим первый закон термодинамики к различным изопроцессам, происходящим с идеальным одноатомным газом.

Изохорный процесс. Пусть идеальный одноатомный газ находится в цилиндрическом сосуде, закрытом неподвижным поршнем ($V = \text{const}$). Нагреём сосуд с газом. Объём газа остаётся практически постоянным (тепловым расширением сосуда пренебрегаем) (рис. 60), следовательно, работа силы давления газа $A = 0$. Тогда первый закон термодинамики примет вид

$$Q = \Delta U. \quad (11.3)$$

Это означает, что всё передаваемое газу количество теплоты идёт на увеличение его внутренней энергии. При этом приращение внутренней энергии газа $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T > 0$ ($T_2 > T_1$) (рис. 61, а). А если газ при изохорном

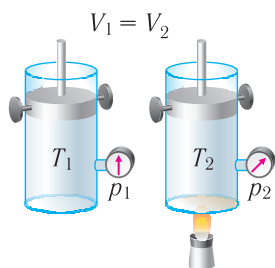


Рис. 60

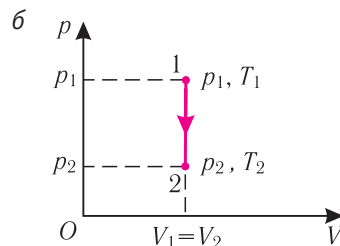
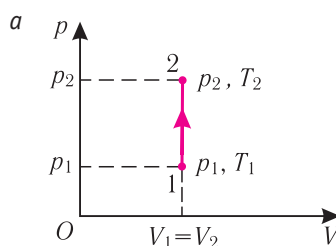


Рис. 61

процессе отдаёт количество теплоты, то его внутренняя энергия убывает:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T < 0 \quad (T_2 < T_1) \quad (\text{рис. 61, б}).$$

Изотермический процесс. Пусть цилиндрический сосуд с газом под поршнем находится в термостате — устройстве, в котором поддерживается постоянная температура. В этом случае внутренняя энергия идеального одноатомного газа $U = \frac{3}{2} \nu R T$ остаётся постоянной, а её изменение $\Delta U = 0$. Тогда первый закон термодинамики примет вид

$$Q = A. \quad (11.4)$$

Какие выводы следуют из этого? Если с помощью внешнего устройства медленно перемещать поршень в сосуде так, чтобы объём газа увеличивался ($\Delta V > 0$, поскольку $V_2 > V_1$) (рис. 62), то работа силы давления расширяющегося газа $A > 0$ (рис. 63, а). При одинаковой первоначальной температуре термостата и газа теплопередачи не происходит. Положительная работа силы давления расширяющегося газа совершается за счёт уменьшения его внутренней энергии, а значит, и температуры. Тут же возникает теплопередача от термостата газу. При медленном перемещении поршня в сосуде температура газа успевает выравниваться, а реально происходящий процесс близок к изотерми-

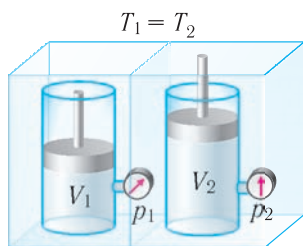


Рис. 62

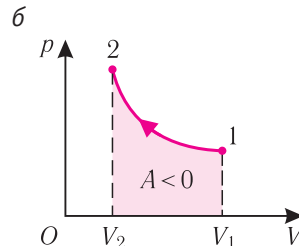
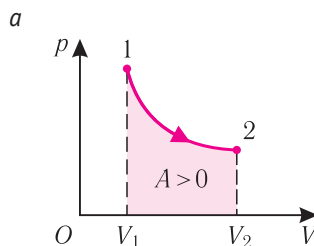


Рис. 63

ческому процессу, при котором расширяющийся газ получает некоторое количество теплоты ($Q > 0$) от термостата.

Если же внешнее устройство обеспечивает медленное уменьшение объёма газа в сосуде ($\Delta V < 0$, так как $V_2 < V_1$), то работа силы давления при сжатии газа $A < 0$ (рис. 63, б) приводит к увеличению внутренней энергии и, следовательно, его температуры. В результате возникает теплопередача от газа термостату. При сжатии газ отдаёт термостату некоторое количество теплоты $Q < 0$. Изотермическое сжатие газа происходит за счёт работы внешних сил: $A' > 0$.

Изобарный процесс. Пусть газ находится в цилиндрическом сосуде, закрытом поршнем, который может свободно или под постоянной нагрузкой перемещаться (рис. 64). Нагреем газ, передав ему некоторое количество теплоты ($Q > 0$). Согласно первому закону термодинамики (11.2) переданное газу количество теплоты частично расходуется на увеличение внутренней энергии ($\Delta U > 0$) системы и частично идёт на совершение работы силой давления газа при его расширении ($A > 0$) (рис. 65, а): $Q = \Delta U + A$.

При изобарном процессе работа расширения (сжатия) газа $A = p\Delta V \neq 0$, и первый закон термодинамики принимает вид

$$Q = \Delta U + p\Delta V. \quad (11.5)$$

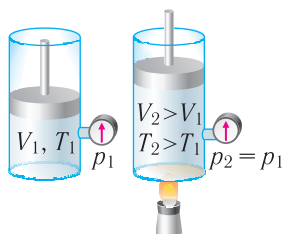


Рис. 64

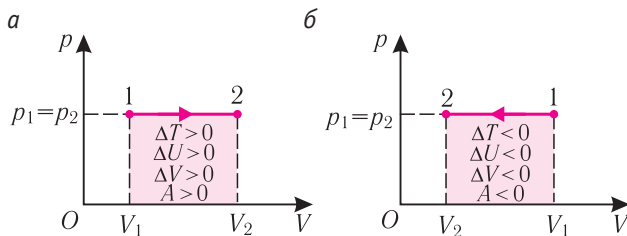


Рис. 65

При изобарном сжатии газа внешние силы совершают работу $A' > 0$. Чтобы давление газа при этом оставалось постоянным, газ необходимо охлаждать, т. е. он должен отдавать в окружающую среду некоторое количество теплоты ($Q < 0$). Понижение температуры газа при изобарном сжатии приводит к уменьшению его внутренней энергии ($\Delta U < 0$). Работа силы давления газа при сжатии $A < 0$ (рис. 65, б).



Удельная теплоёмкость вещества зависит не только от его свойств, но и от характера осуществления процесса теплопередачи. Действительно, из формулы (10.4) сле-

дует, что удельная теплоёмкость $c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{m\Delta T}$.

Тогда согласно первому закону термодинамики при изохорном процессе (11.3) удельная теплоёмкость идеального газа $c_V = \frac{\Delta U}{m\Delta T}$, а при изобарном (11.5) — $c_p = \frac{\Delta U + p\Delta V}{m\Delta T}$. Таким образом, для одинакового увеличения температуры при изобарном нагревании единицы массы газа необходимо передать большее количество теплоты, чем при изохорном нагревании, т. е. $c_p > c_V$.

Это объясняется тем, что при постоянном давлении часть подводимой энергии расходуется на совершение силой давления газа работы при расширении.

Расширение жидких и твёрдых тел при нагревании при постоянном давлении значительно меньше, чем газов, поэтому для них $A \ll \Delta U$ и их удельные теплоёмкости слабо зависят от характера процесса ($c_p \approx c_V$).

Адиабатный процесс. *Адиабатным* называют процесс, в ходе которого термодинамическая система не получает и не отдаёт энергию путём теплопередачи. Таким образом, при адиабатном процессе

$$Q = 0.$$

Применяя к этому процессу первый закон термодинамики, получим:

$$\Delta U = -A, \quad (11.6)$$

или $A = -\Delta U$.

При адиабатном процессе изменение внутренней энергии системы происходит только за счёт совершения работы. Если внешние силы совершают работу по сжатию газа ($\Delta V < 0$, $A < 0$) (рис. 66, а, б), то внутренняя энергия газа увеличивается ($\Delta U > 0$), газ нагревается. Если сила давления газа совершает работу по расширению ($\Delta V > 0$, $A > 0$) (рис. 67, а, б), то внутренняя энергия газа уменьшается ($\Delta U < 0$), газ охлаждается.

На практике адиабатный процесс осуществляется главным образом не за счёт теплоизоляции (нельзя окружить систему оболочкой, которая абсолютно

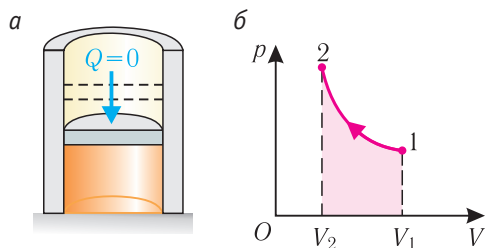


Рис. 66

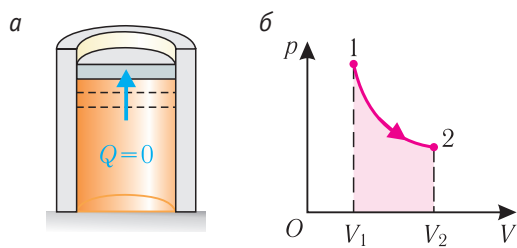


Рис. 67

не допускает теплопередачи), а за счёт скорости протекания процесса. Если процесс протекает очень быстро, то теплопередача практически не сказывается. Очень нагляден опыт, иллюстрирующий уменьшение температуры газа при его адиабатном расширении. Используя насос, через отверстие в пробке будем накачивать в стеклянный сосуд воздух (рис. 68). Через некоторый промежуток времени накачивания сжатый воздух совершит работу по преодолению силы трения, с которой сосуд действует на пробку, и силы атмосферного давления. Теплопередача между сосудом и окружающими телами не успевает проявиться за тот малый промежуток времени, пока пробка вылетает из сосуда. Уменьшение внутренней энергии воздуха в сосуде выражается в понижении его температуры, что приводит к конденсации водяных паров, т. е. к образованию тумана.

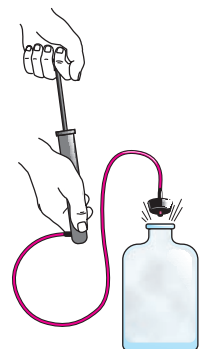


Рис. 68

В качестве примера адиабатного процесса можно привести охлаждение воздуха в атмосфере. Нагретый возле поверхности Земли воздух при быстром подъёме в верхние слои атмосферы расширяется почти адиабатно и при этом резко охлаждается. Водяной пар в нём конденсируется в маленькие капли воды и кристаллики льда, образуя облака. Близкий к адиабатному процесс используют в двигателях внутреннего сгорания.



Обратимый адиабатный процесс относят к изопроцессам, так как он характеризуется постоянством функции состояния, называемой энтропией. В отличие от остальных изопроцессов при обратимом адиабатном процессе происходят изменения давления, объёма и температуры. График адиабатного процесса в координатах (p, V) похож на график изотермического процесса (рис. 69). Однако одному и тому же изменению объёма ΔV при адиабатном процессе соответствует большее изменение давления, чем при изотермическом: $|\Delta p_a| > |\Delta p_i|$ (рис. 69). Это объясняется тем, что в случае адиабатного расширения давление $p = nkT$ уменьшается не только за счёт увеличения объёма газа (и уменьшения концентрации частиц), но и за счёт уменьшения температуры. При изотермическом расширении давление газа уменьшается только за счёт уменьшения концентрации частиц.

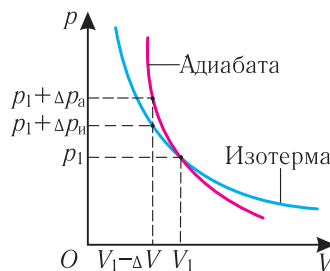


Рис. 69



1. Приращение внутренней энергии термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое равно алгебраической сумме работы, совершённой внешними силами, и количества теплоты, полученного или отданного системой при взаимодействии с внешними телами:

$$\Delta U = A' + Q.$$

2. Количество теплоты, полученное или отданное термодинамической системой при взаимодействии с внешними телами при её переходе из одного состояния в другое, идёт на приращение внутренней энергии системы и на работу, которую система совершает при расширении:

$$Q = \Delta U + A.$$

3. При изохорном процессе всё передаваемое системе количество теплоты идёт на увеличение её внутренней энергии:

$$Q = \Delta U.$$

4. При изотермическом процессе работа расширения или сжатия идеального газа сопровождается теплопередачей между газом и термостатом:

$$A = Q.$$

5. При изобарном процессе переданное идеальному газу количество теплоты частично расходуется на увеличение внутренней энергии газа и частично идёт на совершение работы газом при его расширении:

$$Q = \Delta U + p\Delta V.$$

6. При адиабатном процессе приращение внутренней энергии газа равно работе, которую совершает сила давления газа, взятой с противоположным знаком:

$$\Delta U = -A.$$



1. Приведите две формулировки первого закона термодинамики.
2. В каких случаях изменение внутренней энергии идеального газа отрицательно?
3. Почему невозможно создать «вечный двигатель первого рода»?
4. Какой процесс изменения состояния газа называют адиабатным? Как этот процесс может быть осуществлён?
5. На что расходуется количество теплоты, которое сообщают системе, при изотермическом, изобарном и изохорном процессах?
6. При быстром сжатии газа произошло повышение его температуры. Означает ли это, что газу сообщили некоторое количество теплоты? Можно ли утверждать, что внутренняя энергия газа увеличилась?
- 7*. Можно ли передать газу некоторое количество энергии путём теплопередачи, не вызывая при этом повышения его температуры? Приведите примеры.

8*. В § 10 мы утверждали, что работа, совершаемая при переходе системы из одного состояния в другое, является функцией процесса, т. е. зависит не только от начального и конечного состояний, но и от вида процесса. Используя первый закон термодинамики, докажите, что количество теплоты, получаемое или отдаваемое системой при её переходе из одного состояния в другое, также является функцией процесса.

Примеры решения задач

Пример 1. Идеальный газ, масса которого постоянна, переводят из состояния 1 в состояние 3 двумя различными способами: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ и $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$ (рис. 70), где $1 \rightarrow 2$ и $4 \rightarrow 3$ — изотермы, а $2 \rightarrow 3$ и $1 \rightarrow 4$ — изохоры. Одинаковы ли при каждом переходе: а) приращения внутренней энергии газа; б) работы, совершаемые силами давления газа; в) количества теплоты, сообщённые газу?

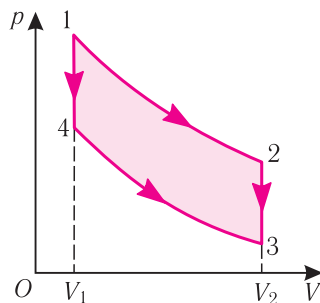


Рис. 70

Решение. а) Так как начальное и конечное состояния для обоих переходов одинаковы, то будут одинаковы и приращения внутренней энергии:

$$\Delta U_{123} = \Delta U_{143} = U_3 - U_1.$$

б) Из рисунка 70 видно, что площадь фигуры, ограниченной осью OV , изотермой и изохорами, проходящими через точки 3 и 4, меньше площади фигуры, ограниченной осью OV , изотермой и изохорами, проходящими через точки 1 и 2. Следовательно, в процессе перехода $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ сила давления газа совершает большую работу, чем в процессе перехода $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$:

$$A_{123} > A_{143}.$$

в) Из первого закона термодинамики следует:

$$Q_{123} = \Delta U + A_{123}, \quad Q_{143} = \Delta U + A_{143}.$$

Поскольку приращения внутренней энергии в обоих случаях одинаковы, а совершённая силой давления газа работа больше при переходе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, то количество теплоты, сообщённое газу, при переходе $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ также будет больше: $Q_{123} > Q_{143}$.

Ответ: а) $\Delta U_{123} = \Delta U_{143}$; б) $A_{123} > A_{143}$; в) $Q_{123} > Q_{143}$.

Пример 2. Идеальный одноатомный газ, давление которого $p = 2,0 \cdot 10^5$ Па, изобарно расширяется так, что его объём возрастает на $\Delta V = 0,40$ м³. Определите приращение внутренней энергии газа и количество теплоты, получаемое газом в этом процессе.

Дано:
 $p = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$
 $\Delta V = 0,40 \text{ м}^3$
 $p = \text{const}$

ΔU — ? Q — ?

Решение. Приращение внутренней энергии идеального одноатомного газа $\Delta U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} R \Delta T$. При изобарном расширении идеального газа изменение его температуры ΔT связано с изменением объёма ΔV газа соотношением $\frac{m}{M} R \Delta T = p \Delta V$

(см. пример решения задачи после § 9). Тогда $\Delta U = \frac{3}{2} p \Delta V$. Согласно первому закону термодинамики для изобарного процесса $Q = \Delta U + p \Delta V$.

$$\text{Отсюда } Q = \frac{3}{2} p \Delta V + p \Delta V = \frac{5}{2} p \Delta V.$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,40 \text{ м}^3 = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,12 \text{ МДж},$$

$$Q = \frac{5}{2} \cdot 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,40 \text{ м}^3 = 2,0 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 0,20 \text{ МДж}.$$

Ответ: $\Delta U = 0,12 \text{ МДж}$, $Q = 0,20 \text{ МДж}$.

Пример 3. В сосуд налита вода массой $m_1 = 800 \text{ г}$, температура которой $t_1 = 60^\circ \text{C}$. В воду добавили некоторое количество льда при температуре $t_2 = -10^\circ \text{C}$. Определите массу льда, если после достижения теплового равновесия температура содержимого сосуда $t_3 = 40^\circ \text{C}$. Теплоёмкостью сосуда можно пренебречь. Удельная теплоёмкость воды $c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, льда —

$$c_2 = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \text{ удельная теплота плавления льда } \lambda = 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Дано:
 $m_1 = 800 \text{ г} = 0,800 \text{ кг}$
 $t_1 = 60^\circ \text{C}$
 $t_2 = -10^\circ \text{C}$
 $t_3 = 40^\circ \text{C}$

$$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_2 = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda = 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

m_2 — ?

Решение. Если пренебречь потерями энергии в окружающую среду, то термодинамическая система «сосуд—вода—лёд» является изолированной. Поэтому учитываем только обмен энергией между входящими в систему телами при теплопередаче. Рассмотрим тепловые процессы, происходящие в системе: 1) нагревание льда от температуры t_2 до температуры плавления $t_0 = 0,0^\circ \text{C}$: $Q_1 = c_2 m_2 (t_0 - t_2)$; 2) плавление льда: $Q_2 = \lambda m_2$; 3) нагревание холодной воды, получившейся при плавлении льда, от температуры t_0 до температуры t_3 : $Q_3 = c_1 m_2 (t_3 - t_0)$; 4) охлаждение тёплой воды массой m_1 от температуры t_1 до температуры t_3 :

$Q_4 = c_1 m_1 (t_3 - t_1)$. Составим уравнение теплового баланса: $Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = 0$, или

$$c_2 m_2 (t_0 - t_2) + \lambda m_2 + c_1 m_2 (t_3 - t_0) + c_1 m_1 (t_3 - t_1) = 0.$$

$$\text{Отсюда масса льда } m_2 = \frac{c_1 m_1 (t_1 - t_3)}{c_2 (t_0 - t_2) + \lambda + c_1 (t_3 - t_0)}.$$

$$m_2 = \frac{4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 0,800 \text{ кг} (60^\circ \text{C} - 40^\circ \text{C})}{2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (0,0^\circ \text{C} + 10^\circ \text{C}) + 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} + 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot (40^\circ \text{C} - 0,0^\circ \text{C})} = 0,13 \text{ кг}.$$

Ответ: $m_2 = 0,13 \text{ кг}$.

Упражнение 9

1. Совершив циклический процесс, идеальный газ возвращается в исходное состояние. Определите работу газа в этом процессе, если алгебраическая сумма количества полученной и отданной теплоты $Q = 84 \text{ Дж}$.

2. При адиабатном расширении силой давления газа совершена работа $A = 265 \text{ Дж}$. Определите приращение внутренней энергии газа. Как изменилась температура газа?

3. Определите количество теплоты, сообщённое кислороду, если при изотермическом расширении работа, совершённая силой давления газа, $A = 6,4 \text{ кДж}$.

4. В герметично закрытом баллоне находится азот массой $m = 4,00 \text{ кг}$. Определите количество теплоты, сообщённое азоту при повышении его температуры на $\Delta T = 120 \text{ К}$, если удельная теплоёмкость азота при постоянном объёме $c_V = 745 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. При сообщении идеальному одноатомному газу количества теплоты $Q = 60 \text{ Дж}$ его температура увеличилась при постоянном давлении на $\Delta T = 10 \text{ К}$. Определите количество вещества газа.

6. При изобарном расширении гелия массой $m = 20 \text{ г}$ его объём увеличился в два раза. Определите работу, совершённую силой давления при расширении газа, и количество теплоты, сообщённое газу, если его начальная температура $T_1 = 300 \text{ К}$.

7. При изобарном расширении силой давления идеального одноатомного газа совершена работа $A = 50,0 \text{ кДж}$. Определите увеличение внутренней энергии газа и количество теплоты, сообщённое этому газу.

8. В сосуд, содержащий воду объёмом $V_1 = 3,2 \text{ л}$ при температуре $t_1 = 20^\circ \text{C}$, бросили кусок стали массой $m_2 = 4,0 \text{ кг}$, нагретый до температуры $t_2 = 360^\circ \text{C}$.

В результате теплообмена вода нагрелась до температуры $t_3 = 50^\circ\text{C}$, а часть её обратилась в пар. Определите массу воды, обратившейся в пар. Теплоёмкостью сосуда можно пренебречь. Для воды: удельная теплоёмкость

$c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$, плотность $\rho_1 = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удельная теплота парообразования $L_1 = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, температура кипения $t_k = 100^\circ\text{C}$. Удельная теплоём-

кость стали $c_2 = 4,6 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$.

9*. С идеальным газом определённой массы осуществлён процесс, график которого представлен на рисунке 71. Определите: а) на каких участках графика работа газа положительная; б) на каких участках графика газ получал энергию, а на каких — отдавал.

10*. Гелий, количество вещества которого $\nu = 2,0$ моль, находящийся при температуре $T = 300\text{ К}$, сначала изобарно нагревают, а затем изохорно переводят в состояние с температурой, равной начальной. Определите, во сколько раз увеличился объём гелия, если алгебраическая сумма количества полученной и отданной теплоты $Q = 4,2\text{ кДж}$.

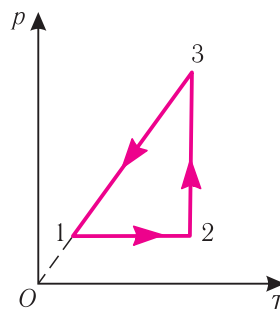


Рис. 71

§ 12. Тепловые двигатели. Принцип действия тепловых двигателей и их КПД. Экологические проблемы использования тепловых двигателей

Люди давно научились использовать изменение внутренней энергии тела, происходящее при совершении механической работы. Например, можно согреть руки, потерев ладони друг о друга, или добыть огонь трением одного куска дерева о другой. Гораздо больше времени понадобилось человечеству в процессе своего развития, чтобы научиться использовать механическую работу, получаемую путём передачи телу некоторого количества теплоты. Только в 1765 г., сравнительно недавно по историческим меркам, русскому изобретателю И. И. Ползунову удалось создать первое практически полезное универсальное устройство для осуществления этой цели — паровую машину. Изобретение паровой машины, а впоследствии и двигателя внутреннего сгорания французским инженером Э. Ленуаром в 1860 г. имело исключительно важное значение. Сейчас трудно представить нашу жизнь без автомобилей, самолётов, кораблей и других

устройств, в которых внутренняя энергия сжигаемого топлива и его окислителя частично преобразуется в механическую работу.

Необратимость процессов в природе. Первый закон термодинамики не позволяет определить, в каком направлении может происходить термодинамический процесс. Первый закон термодинамики допускает самопроизвольный переход энергии как от более нагретого тела к менее нагретому, так и наоборот. Важно только то, чтобы уменьшение внутренней энергии одного тела было равно увеличению внутренней энергии другого тела. На самом же деле самопроизвольный переход энергии от менее нагретого к более нагретому телу в природе не происходит. Например, невозможно наблюдать, чтобы при опускании холодной ложки в горячий чай ложка охлаждалась ещё больше, передавая некоторое количество теплоты горячему чаю. На самом деле всегда некоторое количество теплоты самопроизвольно переходит от горячего чая к холодной ложке, пока в системе «чай—ложка» не установится тепловое равновесие с одинаковой температурой всей системы.

Утверждение, высказанное Р.Клаузиусом в 1850 г. о том, что невозможна самопроизвольная передача количества теплоты от менее нагретого тела к более нагретому, носит название *второго закона термодинамики*.

Таким образом, второй закон термодинамики констатирует тот факт, что *количество теплоты самопроизвольно может переходить только от более нагретых тел к менее нагретым*. Этот научный факт и определяет единственно возможное направление самопроизвольного протекания тепловых процессов — они идут в направлении к состоянию теплового равновесия.

!

• Этот же закон в 1851 г. сформулировал и У.Томсон: «Невозможно при помощи неодушевлённого материального деятеля получить от какой-либо массы вещества механическое действие путем охлаждения её ниже температуры самого холодного из окружающих предметов».

Отметим, что в холодильных установках процесс теплопередачи идёт от более холодного тела к менее холодному. У охлаждаемого продукта уменьшается внутренняя энергия, а значит, и его температура, и убыль внутренней энергии в виде количества теплоты передаётся в окружающую среду (с более высокой, чем у продукта, температурой). Но этот процесс передачи количества теплоты не самопроизвольный, он происходит за счёт работы двигателя компрессора холодильника.

Тепловые двигатели. Как уже отмечалось в § 11, в адиабатном процессе сила давления газа совершает работу за счёт изменения его внутренней энергии, а в изотермическом процессе — за счёт теплопередачи между термостатом и газом. Адиабатный и изотермический процессы расширения газа позволяют использовать часть внутренней энергии сжигаемого топлива для совершения механической работы. Двигатели, в которых происходит превращение части

внутренней энергии сжигаемого топлива и его окислителя (например, кислорода из воздуха) в механическую работу, называют *тепловыми двигателями*.

В качестве упрощённой модели теплового двигателя рассмотрим цилиндрический сосуд, в котором находится газ (воздух) под поршнем. Поместим на поршень тело массой m и будем нагревать газ в цилиндре (рис. 72, а). Давление газа начинает увеличиваться, поршень приходит в движение и поднимает тело на некоторую высоту Δh (рис. 72, б). Объём газа увеличивается, т. е. сила давления газа совершает работу ($A > 0$). Но в данном случае устройству свойственно одноразовое выполнение работы. Понятно, что такие устройства малопригодны. Поэтому первый принцип действия тепловых двигателей — цикличность (непрерывность) их работы. Тело, совершающее работу, — *рабочее тело*, после получения количества теплоты Q_1 от *нагревателя*, находящегося при температуре T_1 , должно в конечном счёте вернуться в исходное состояние, чтобы снова начать такой же процесс.

Для возвращения поршня в исходное положение газ необходимо сжать до первоначального объёма. При этом внешняя сила совершает работу сжатия. Но если сжатие будет происходить при той же температуре, что и расширение газа, то работа внешних сил будет равна работе силы давления газа при его расширении. В результате полная работа газа за один цикл (расширение — сжатие) окажется равной нулю. Отсюда вытекает второй принцип действия тепловых двигателей — сжатие газа должно происходить при более низкой температуре T_2 , чем его расширение (рис. 73). Из рисунка видно, что в этом случае полная работа газа за цикл положительная ($A > 0$) и численно равна площади фигуры $ABCD$: $S_{ABCD} = S_{ABEF} - S_{DCEF}$.

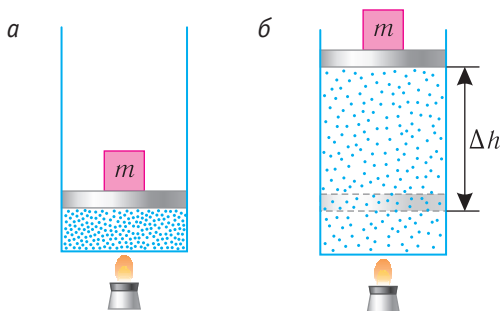


Рис. 72

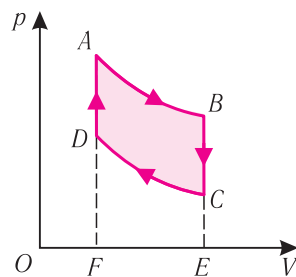


Рис. 73

Таким образом, перед сжатием рабочее тело необходимо охладить. Это осуществляется путём передачи количества теплоты Q_2 третьему телу — *холодильнику*. Из сказанного следует, что для работы циклического теплового дви-

гателя кроме нагревателя и рабочего тела необходимо наличие холодильника.

Схема теплового двигателя приведена на рисунке 74. Тепловой двигатель состоит из нагревателя, рабочего тела (как правило, газ) и холодильника (атмосфера или вода при температуре окружающей среды — около 300 К). Энергия, выделяемая при сгорании топлива в нагревателе, передаётся рабочему телу (газу) путём теплопередачи. При расширении газа часть его внутренней энергии идёт на совершение работы. Некоторое количество теплоты неизбежно передаётся холодильнику.

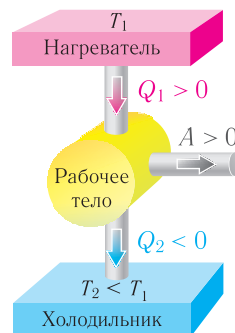


Рис. 74

Эффективнее всего охладить рабочее тело перед сжатием можно путём адиабатного расширения газа, при котором его температура понизится до температуры холодильника T_2 . Далее при изотермическом сжатии рабочее тело передает холодильнику количество теплоты Q_2 . Завершать цикл теплового двигателя эффективнее всего адиабатным сжатием газа до температуры T_1 .

Таким образом, при работе рассматриваемого теплового двигателя происходят следующие процессы (рис. 75): 1) изотермическое расширение газа ($A \rightarrow B$, при этом газ получает некоторое количество теплоты Q_1 от первого термостата с температурой T_1 — нагревателя); 2) адиабатное расширение газа ($B \rightarrow C$, температура газа понижается до температуры T_2 ($T_2 < T_1$)); 3) изотермическое сжатие при температуре T_2 ($C \rightarrow D$, газ приводят в соприкосновение со вторым термостатом — холодильником, температура которого T_2 , при сжатии некоторое количество теплоты Q_2 передается от газа холодильнику); 4) адиабатное сжатие газа до первоначального объема ($D \rightarrow A$, температура газа увеличивается до T_1).

Цикл работы теплового двигателя, соответствующий изображенному на рисунке 75, называют *циклом Карно* (в честь французского физика и инженера С. Карно (1796—1832)). Причём Карно рассмотрел идеальный цикл, в котором не учитывал потери энергии, обусловленные неполным сгоранием топлива и трением (в том числе и вязким в потоках газа), а также не изотермичность и неадиабатность процессов сжатия и расширения в реальных тепловых двигателях.

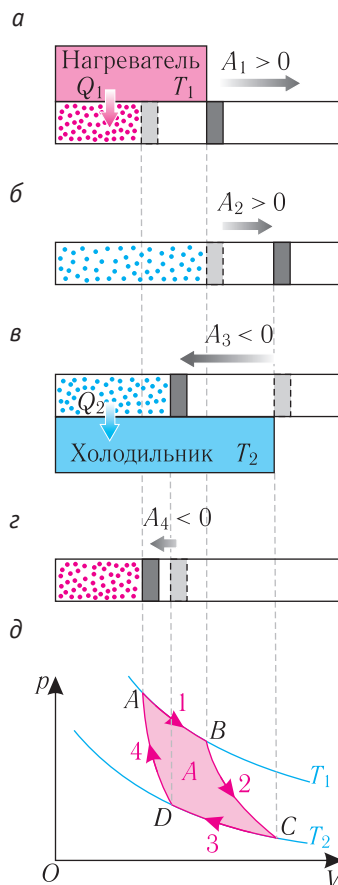


Рис. 75

Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя. *Коэффициент полезного действия теплового двигателя* — отношение полезно используемой энергии $E_{\text{полезн}}$ к общему количеству энергии E , получаемому системой:

$$\eta_{\text{э}} = \frac{E_{\text{полезн}}}{E}.$$

Определяемый таким образом КПД тепловых двигателей называют *эффективным КПД*. При этом $E = Q_{\text{полн}}$, где $Q_{\text{полн}}$ — количество теплоты, выделяемое при полном сгорании топлива.

Степень совершенства преобразования определённой части внутренней энергии нагревателей в механическую работу, происходящего в цилиндрах теплового двигателя, характеризуют *термическим (термодинамическим)*

коэффициентом полезного действия $\eta_t = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1}$, где $A_{\text{ц}}$ — работа, совершаемая рабочим телом за цикл, Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя за цикл. Если Q_2 — количество теплоты, отданное рабочим телом холодильнику ($Q_2 < 0$), то $A_{\text{ц}} = Q_1 + Q_2 = Q_1 - |Q_2|$ и

$$\eta_t = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \quad (12.1)$$

Из формулы (12.1) следует, что термический КПД теплового двигателя зависит от процессов, в которых участвует рабочее тело, и всегда меньше единицы. Реальные тепловые двигатели имеют следующие средние значения термического КПД: дизельный двигатель — 40 %; газотурбинные установки — 25—30 %; паровая турбина — 40 %.

В 1824 г. Карно доказал, что коэффициент полезного действия всех обратимых машин, работающих в идентичных условиях (т. е. при одинаковых температурах нагревателя T_1 и холодильника T_2), определяется только температурами нагревателя и холодильника и не зависит от рода вещества рабочего тела. КПД идеального цикла Карно η_K является максимально возможным при заданных T_1 и T_2 :

$$\eta_K = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (12.2)$$

Таким образом, КПД любого реального теплового двигателя не может превышать КПД идеального цикла Карно: $\eta < \eta_K = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$.

Анализ последнего неравенства позволяет выявить возможные пути увеличения КПД тепловых двигателей: повышение температуры нагревателя T_1 и понижение температуры холодильника T_2 .

КПД идеального теплового двигателя мог бы быть равен единице, если бы было возможно использовать холодильник с температурой, равной абсолютному нулю ($T_2 = 0$). В этом случае $\eta_K = \frac{T_1}{T_1} = 1$. Но, как известно, это невозможно даже теоретически, потому что абсолютного нуля температуры достичь нельзя. Основным направлением увеличения КПД тепловых двигателей является повышение разности температур $T_1 - T_2$ — нагревателя и холодильника.

В автомобильных двигателях внутреннего сгорания эффективный коэффициент полезного действия определяют по экспериментальной механической мощности P двигателя и сжигаемому за единицу времени количеству топлива. Так, если за промежуток времени t сожжено топливо массой m , имеющее удельную теплоту сгорания q , то

$$\eta_s = \frac{Pt}{qm}.$$

Из сформулированного можно сделать вывод, что $\eta_s < \eta_t$.

Значение тепловых двигателей и экологические проблемы их использования. Наибольшее значение имеет использование тепловых двигателей в энергетике и на транспорте. Тепловые двигатели — паровые турбины — устанавливают на тепловых и атомных электростанциях, где энергия пара превращается в механическую энергию роторов генераторов электрического тока. В первом случае пар высокой температуры получают за счёт сгорания топлива, а во втором — за счёт энергии, выделяющейся в ходе ядерных реакций.

Изобретение двигателя внутреннего сгорания сыграло огромную роль в автомобилестроении, в усовершенствовании сельскохозяйственной и строительной техники. Карбюраторные двигатели внутреннего сгорания устанавливают на автомобилях, мотоциклах, вертолётах и самолётах, дизельные — на теплоходах, тепловозах, тракторах, тяжёлых автомобилях. Создание реактивного двигателя позволило поднять самолёты на большую высоту, увеличить скорость и дальность их полётов.

Однако интенсивное использование тепловых двигателей в энергетике и на транспорте отрицательно влияет на окружающую среду.

При работе тепловые двигатели выбрасывают в атмосферу огромное количество горячего пара или газа, что приводит к тепловому загрязнению атмосферы. Широкое использование различных видов топлива влечёт за собой увеличение в атмосфере углекислого газа (диоксид углерода CO_2). Соединяясь с водяными парами в атмосфере, углекислый газ образует угольную кислоту, которая даже при малых концентрациях, выпадая в виде кислотного дождя, за столетия разъедает кирпич, металл, мрамор.

Сжигание топлива на тепловых электростанциях ведёт к накоплению в атмосфере угарного газа (оксид углерода CO), являющегося ядом для живых организмов. Например, при сгорании 1 т бензина образуется 60 кг оксида углерода. При работе автотранспорта наряду с оксидом углерода в атмосферу попадают соединения свинца. При горении топливо использует кислород из атмосферы, что приводит к постепенному уменьшению его концентрации в воздухе и, кроме того, образованию оксидов азота (NO_x). Растворяясь в дождевой воде, они становятся азотной кислотой, а реагируя с содержащимися в воздухе разнообразными примесями, образуют токсичные соединения, которые выпадают на поверхность воды и суши с кислотными дождями. Это приводит к засолению почв, открытых и подземных водоёмов, гибели лесов, нарушению химического состава в экосистемах. Кроме того, в «кислой» воде лучше растворяются такие ядовитые вещества, как кадмий, ртуть, свинец, содержащиеся в почве и донных отложениях, что влияет на чистоту воды, потребляемой людьми и животными.

При полётах самолётов и запусках ракет происходит разрушение озонового слоя атмосферы, который защищает всё живое на Земле от избыточности ультрафиолетового излучения Солнца.

Решение проблем, возникающих при сжигании топлива работающими тепловыми двигателями, учёные и конструкторы видят в:

а) экологизации технологических процессов (создании безотходных и малоотходных технологий, исключающих попадание в атмосферу вредных веществ); очистке газовых выбросов в атмосферу (улавливании и переработке углекислого газа, оксидов азота и других токсичных веществ);

б) увеличении коэффициента полезного действия тепловых двигателей, в частности, путём создания условий для наиболее полного сгорания топлива;

в) замене тепловых двигателей на более экологически чистые двигатели, например, электрические.

В дополнение к перечисленному во многих странах мира в законодательном порядке приняты предельно допустимые нормы содержания токсичных компонентов в выхлопных газах. В Республике Беларусь правилами дорожного движения запрещена эксплуатация автомобилей, содержание оксида углерода в отработанных газах которых превышает 1,5 %. Для выявления таких транспортных средств введена система инструментального контроля при прохождении государственного технического осмотра.

Рациональная организация автомобильного движения в городах (строительство скоростных магистралей, дополнительных развязок и эстакад, способствующее уменьшению числа светофоров и «пробок») также позволит уменьшить вредные выбросы в атмосферу при эксплуатации транспортных средств.



1. Протекающие в природе процессы с макроскопическими телами необратимы: невозможен самопроизвольный процесс, который сопровождается передачей некоторого количества теплоты от холодного тела к горячему.

2. Двигатели, в которых происходит превращение части внутренней энергии сжигаемого топлива и его окислителя в механическую работу, называют тепловыми двигателями.

3. Термическим коэффициентом полезного действия теплового двигателя называют отношение работы, совершаемой рабочим телом за цикл, к количеству теплоты, полученному за цикл рабочим телом от нагревателя:

$$\eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}.$$

4. Максимально возможное значение термического коэффициента полезного действия идеального теплового двигателя:

$$\eta_K = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$



1. Приведите примеры наиболее типичных необратимых процессов.

2. Что называют тепловым двигателем? Какие принципы положены в основу создания тепловых двигателей?

3. В чём состоит роль нагревателя, холодильника и рабочего тела теплового двигателя?

4. Может ли эффективный КПД теплового двигателя стать равным единице, если трение в частях двигателя свести к нулю?

5. Как наиболее эффективно увеличить термический КПД теплового двигателя?

6. Как определяют эффективный коэффициент полезного действия для автомобильных двигателей внутреннего сгорания?

7*. Можно ли охладить воздух в комнате, если открыть дверцу работающего холодильника?

Примеры решения задач

Пример 1. Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя $\eta_t = 20\%$. Определите работу, совершённую им за цикл, если количество теплоты, переданное холодильнику, $Q_2 = -1,2$ кДж.

Дано:

$$\eta_t = 0,20$$

$$|Q_2| = 1,2 \text{ кДж} = 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$A_{ц} = ?$$

Решение. Термический коэффициент полезного

$$\text{действия теплового двигателя } \eta_t = \frac{A_{ц}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1},$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим

телом от нагревателя. Тогда $Q_1 = \frac{|Q_2|}{1 - \eta_t}$. Таким образом, $A_{ц} = \eta_t Q_1 = \frac{\eta_t |Q_2|}{1 - \eta_t}$.

$$A_{ц} = \frac{0,20 \cdot 1,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}}{0,80} = 0,30 \text{ кДж.}$$

Ответ: $A = 0,30 \text{ кДж.}$

Пример 2. Каждый из четырёх двигателей реактивного самолёта на пути $s = 5,0 \cdot 10^3 \text{ км}$ развивает среднюю силу тяги $\langle F \rangle = 0,11 \text{ МН}$. Определите объём керосина, израсходованного на этом пути, если эффективный коэффициент полезного действия двигателя $\eta_э = 24 \%$. Плотность и удельная теплота сгорания керосина соответственно $\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Дано:

$$s = 5,0 \cdot 10^3 \text{ км} = 5,0 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$\langle F \rangle = 0,11 \text{ МН} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н}$$

$$\eta_э = 0,24$$

$$\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$V = ?$

Решение. По определению эффективный

$$\text{коэффициент полезного действия } \eta_э = \frac{A_{\text{полезн}}}{Q_{\text{полн}}},$$

где $A_{\text{полезн}} = 4 \langle F \rangle s$ — полезная работа, совершённая всеми четырьмя двигателями самолёта, $Q_{\text{полн}} = q \rho V$ — количество теплоты, выделяемое при полном сгорании керосина на пути s . Тогда

$$\eta_э = \frac{4 \langle F \rangle s}{q \rho V}, \text{ откуда } V = \frac{4 \langle F \rangle s}{\eta_э q \rho}.$$

$$V = \frac{4 \cdot 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot 5,0 \cdot 10^6 \text{ м}}{0,24 \cdot 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м}^3.$$

Ответ: $V = 2,7 \cdot 10^2 \text{ м}^3$.

Упражнение 10

1. За один цикл рабочее тело теплового двигателя получает от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 800 \text{ Дж}$ и передаёт холодильнику количество теплоты $Q_2 = -600 \text{ Дж}$. Определите термический коэффициент полезного действия теплового двигателя.

2. Температура нагревателя идеального теплового двигателя $T_1 = 390 \text{ К}$, а температура его холодильника $T_2 = 290 \text{ К}$. Определите термический коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя.

3. Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя $\eta_t = 20\%$. Определите количество теплоты, переданное рабочему телу от нагревателя, если за цикл рабочим телом совершена работа $A_{\text{ц}} = 300$ Дж.

4. Идеальный тепловой двигатель за счёт каждого килоджоуля энергии, получаемой от нагревателя, за цикл совершает работу $A_{\text{ц}} = 250$ Дж. Определите термический коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя и температуру его нагревателя, если температура холодильника $T_2 = 300$ К.

5*. Термический коэффициент полезного действия идеального теплового двигателя $\eta_{t1} = 30\%$. Определите, на сколько процентов возрастёт термический коэффициент полезного действия, если температуру холодильника уменьшить на 25% , не меняя температуру нагревателя.

6*. Нагревателем идеального теплового двигателя является резервуар с кипящей водой при температуре $t_1 = 100$ °С, а холодильником — сосуд со льдом при температуре $t_2 = 0,0$ °С. Определите массу растаявшего за один цикл льда, если рабочее тело двигателя за один цикл совершает работу $A_{\text{ц}} = 1,0$ МДж. Удельная теплота плавления льда $\lambda = 3,33 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

7*. Результатом работы идеального теплового двигателя был подъём груза массой $m = 100$ кг на высоту $h = 20$ м. Отношение количества теплоты, полученного за один цикл от нагревателя, к температуре нагревателя $\frac{Q_1}{T_1} = 20 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$, а разность температур нагревателя и холодильника $T_1 - T_2 = 125$ К. Определите, какое количество циклов было совершено за время подъёма груза.

8. Мотоцикл в течение некоторого промежутка времени движется со скоростью, модуль которой $v = 30 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. При этом расход бензина на пути $s = 100$ км составляет $V_0 = 4,0$ л. Определите среднюю мощность двигателя мотоцикла, если эффективный коэффициент полезного действия двигателя $\eta_3 = 25\%$. Плотность и удельная теплота сгорания бензина соответственно $\rho = 7,1 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $q = 46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.

9. Для работы двигателя электрогенератора, эффективный коэффициент полезного действия которого $\eta_3 = 20,0\%$, запасена цистерна дизельного топлива объёмом $V = 62,0$ м³. Определите, на сколько дней хватит этого топлива при ежедневной работе двигателя в течение промежутка времени $t = 7,00$ ч, если средняя мощность двигателя во время работы $\langle P \rangle = 150$ кВт. Плотность и удельная теплота сгорания дизельного топлива соответственно $\rho = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $q = 42,0 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$.



По современным представлениям основой всего многообразия явлений природы являются четыре фундаментальных взаимодействия между частицами микромира (электрон, протон и др.) — сильное, слабое, электромагнитное и гравитационное. Каждый вид взаимодействия связан с определённой характеристикой частицы. Например, гравитационное взаимодействие зависит от масс частиц, электромагнитное — от электрических зарядов.

Электромагнитное взаимодействие лежит в основе всех электрических, магнитных и оптических явлений. Этим же взаимодействием обусловлены силы упругости и силы трения, известные вам из механики. Взаимодействие атомов и молекул, которое мы рассматривали при изучении молекулярно-кинетической теории, также является электромагнитным. Электромагнитное взаимодействие определяет свойства веществ в различных агрегатных состояниях и их химические превращения. Поскольку молекулярные силы имеют электромагнитную природу, то практически все биологические явления обусловлены электромагнетизмом.

Электродинамика — раздел физики, в котором изучают закономерности физических явлений, обусловленных электрическими и магнитными взаимодействиями, материальным носителем которых является электромагнитное поле. Термин «электродинамика» ввёл в физику французский учёный Андре Мари Ампер (1775—1836) в 1822 г.

При изучении электродинамики вы познакомитесь с законами взаимодействия тел (частиц), обладающих электрическим зарядом, особенностями упорядоченного движения заряженных частиц, физическими величинами, характеризующими электрические и магнитные явления.

В 10 классе вам предстоит изучить следующие разделы электродинамики: электростатика, постоянный электрический ток, ток в различных средах и электромагнитные явления.

Электростатика — раздел электродинамики, в котором изучают свойства, взаимодействие и условия равновесия *неподвижных* в некоторой инер-

циальной системе отсчёта электрически заряженных тел, распределение заряда на которых не изменяется со временем, а также электростатические поля, создаваемые зарядами таких тел. Термин «электростатика» введён Ампером в 1822 г. Фундамент электростатики составляют экспериментальные научные факты, отражающие поведение заряженных тел при их электрическом взаимодействии. Ядро электростатики составляют закон сохранения электрического заряда, опытным путём установленный в 1759 г. петербургским академиком Францем Эпинусом (1724—1802), и закон взаимодействия покоящихся точечных зарядов, экспериментально открытый в 1785 г. французским учёным Шарлем Кулоном (1736—1806).

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 13. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

На уроках физики в 8 классе при проведении опытов вы наблюдали притяжение крошек пенопласта, небольших кусочков бумаги (рис. 76), лёгкой станиолевой гильзы (рис. 77) к потёртой о сухую бумагу пластмассовой линейке или стеклянной палочке. Во всех перечисленных случаях имело место явление электризации тел. Оно заключается в возникновении противоположных по знаку электрических зарядов, модули которых равны, на первоначально электрически нейтральных телах. А что означает, что тело или частица обладает электрическим зарядом? Как взаимодействуют электрически заряженные тела?

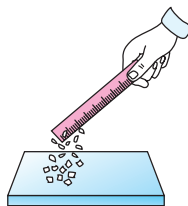


Рис. 76

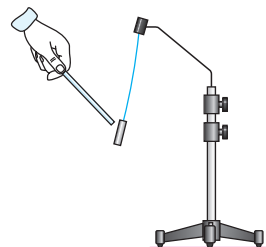


Рис. 77

Электрический заряд. Электрический заряд частицы является источником электромагнитного поля, связанного с материальным носителем. Электрический заряд, или количество электричества (обозначают буквой q или Q), — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц). Электрическому заряду присущи следующие фундаментальные свойства:

1) электрический заряд существует в двух видах, которые названы положительным и отрицательным зарядом (существование двух видов заряда установил Шарль Дюфэ (1698—1739) в 1733 г., а в 1747 г. Бенджамин Франклин (1706—1790) приписал им знаки «+» и «-»);

2) в любой электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов тел (частиц) не изменяется;

3) значение электрического заряда тела (частицы) не зависит от выбора системы отсчёта, а значит, не зависит от того, движется оно (она) или покоится;

4) электрический заряд тела (частицы) не зависит ни от его (её) механического состояния, ни от каких-либо действующих на него (неё) сил.

Носителем заряда может быть как элементарная частица, так и макроскопическое тело.



В одном моле вещества ($\sim 6 \cdot 10^{23}$ молекул) заряженного тела обычно содержится относительно небольшое количество электронов (до $\sim 1 \cdot 10^{10}$), избыточных или недостающих по сравнению с числом протонов. Это вызывает изменение массы заряженного тела не более чем на $9 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^{10} = 9 \cdot 10^{-21} \text{ кг}$ по сравнению с массой нейтрального тела. Такое изменение массы, конечно, можно не учитывать.

Как вы знаете, электрическое взаимодействие проявляется в том, что одноимённо заряженные тела (частицы) отталкиваются друг друга (рис. 78, а), а разноимённо заряженные — притягивают друг друга (рис. 78, б). Если в *электрически нейтральном теле заряды распределены неравномерно* и вследствие этого возникли противоположно заряженные части, то такие тела тоже электрически взаимодействуют (см. рис. 76 и 77).

Заряды разных тел (частиц) могут отличаться не только знаком, но и числовым значением.

За единицу электрического заряда в СИ принят кулон (Кл). Эта единица названа в честь Ш. Кулона. 1 Кл — электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за промежуток времени 1 с при силе постоянного тока 1 А.



Один кулон — очень большая единица заряда. Расчёты показывают, что диаметр удалённого от всех остальных тел металлического шара, находящегося в сухом воздухе, должен быть равен примерно 110 м, чтобы на нём мог находиться избыточный заряд 1 Кл. Вместе с тем при включении автомобильных фар сила тока в цепи приблизительно 10 А, т. е. каждую секунду через поперечное сечение проводников, подсоединённых к фарам, проходит заряд приблизительно 10 Кл.

На рубеже XIX и XX столетий учёные экспериментально установили, что в природе существует электрический заряд, модуль которого минимален, называемый

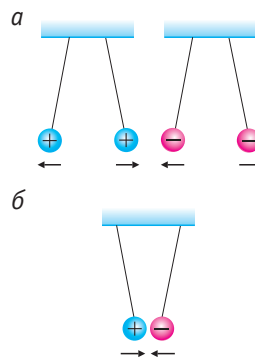


Рис. 78

элементарным. Ядра всех атомов содержат протоны, которые являются носителями положительного элементарного заряда, а сами атомы содержат электроны, являющиеся носителями отрицательного элементарного заряда. Равенство модулей зарядов электрона и протона установлено с точностью $\sim 10^{-20}$. Модуль элементарного электрического заряда $e = 1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл. Обычно ограничиваются двумя значащими цифрами: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Электроны, протоны и нейтроны входят в состав всех тел, так как из них состоят атомы и молекулы любого вещества. В электрически нейтральном теле алгебраическая сумма зарядов всех частиц равна нулю. Если каким-нибудь образом создать в таком теле избыток зарядов одного знака, то оно окажется заряженным. Заряд q тела образуется совокупностью элементарных зарядов и всегда кратен элементарному заряду e (электрический заряд дискретен):

$$q = e(N_p - N_e),$$

где N_p и N_e — числа протонов и электронов в данном теле.

Например, тело, заряд которого $q = 7e$, отличается от нейтрального тела потерей семи электронов.

Закон сохранения электрического заряда. Модули противоположных по знаку зарядов, возникших в результате электризации на находившихся в контакте тела, равны. В этом можно убедиться на опыте. Возьмём эбонитовую палочку и кусочек меха. При трении друг о друга тела электризуются. Поместим поочерёдно внутрь металлической сферы, укреплённой на стержне электрометра, эбонитовую палочку (рис. 79, а) и кусочек меха (рис. 79, б). Стрелка электрометра отклонится, причём как в первом, так и во втором случаях на один и тот же угол. Если одновременно опустить внутрь сферы эбонитовую палочку и кусочек меха (рис. 79, в), то стрелка электрометра останется на месте. Следовательно, модули зарядов обоих тел равны, а их знаки противоположны.

Результаты многочисленных экспериментов позволили сформулировать утверждение, которое является фундаментальным законом природы — *законом сохранения электрического заряда*: **в электрически изолированной системе при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной:**

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const},$$

где n — число зарядов в системе. Систему тел (частиц) называют *электрически изолированной*, если между ней и внешними телами нет обмена электрически заряженными частицами.

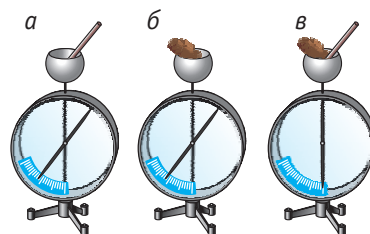


Рис. 79



1. Электрический заряд — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц). Электрический заряд существует в двух видах: положительный и отрицательный. Одноимённые заряды отталкиваются, а разноимённые — притягиваются.

2. Существует заряд, модуль которого минимален, называемый элементарным:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

3. Электрический заряд дискретен, т. е. электрический заряд любой частицы или тела является кратным элементарному электрическому заряду.

4. Закон сохранения электрического заряда: в электрически изолированной системе при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной:

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const.}$$

5. Значение электрического заряда не зависит от того, движется он или покоится.



1. Как объяснить электризацию тел при соприкосновении? Почему при электризации заряжаются оба тела?

2. Что характеризует электрический заряд?

3. Может ли существовать электрический заряд без материального носителя?

4. Какие два вида электрических зарядов существуют в природе? Как взаимодействуют одноимённо заряженные частицы? разноимённо заряженные?

5. Какой заряд называют элементарным?

6. В чём проявляется свойство дискретности электрического заряда?

7. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. Каковы границы применимости этого закона?

Упражнение 11

1. Можно ли при электризации стеклянной палочки о шёлк сообщить ей заряд $q = 4,8 \cdot 10^{-21}$ Кл?

2. Металлический шарик имеет $N = 5,0 \cdot 10^5$ избыточных электронов. Определите, чему равен его заряд.

3. Определите суммарный заряд всех протонов, содержащихся в воде объёмом $V = 9,0 \text{ см}^3$.

4. При скольжении стеклянного бруска с наклонной плоскости происходит его электризация. Как это влияет на конечную скорость бруска?

5. Два одинаковых металлических шара, электрические заряды которых $-q$ и $4q$, привели в соприкосновение. Определите, чему равен заряд каждого шара после соприкосновения.

6. Металлический шар, заряд которого $q = -4,8 \cdot 10^{-11}$ Кл, привели в соприкосновение с точно таким же незаряженным шаром. Какой заряд получил второй шар? Сколько избыточных электронов осталось на первом шаре?

7*. Положительный заряд медного шара $q = 25$ нКл. Какую часть своих валентных электронов потерял шар, если его масса $m = 0,10$ кг? Валентность меди $n = 1$.

§ 14. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона

Обсуждая электризацию как электростатическое явление, мы не задавали вопрос: «А как определить силу, с которой одно заряженное тело притягивает или отталкивает другое?». Ответ на этот вопрос был найден в конце XVIII столетия независимо друг от друга двумя учёными: Г. Кавендишем в 1774 г. и Ш. Кулоном в 1785 г. Однако современникам стали известны только результаты опытов Кулона.

Закон Кулона. Вы уже встречались с физическими моделями при изучении механики (материальная точка) и молекулярной физики (идеальный газ). В электростатике при изучении взаимодействия электрически заряженных тел эффективной оказывается модель «точечный заряд». *Точечный заряд* — заряд такого заряженного тела, размеры которого значительно меньше расстояния от этого тела до точки наблюдения и до других тел (т. е. размерами заряженного тела в условиях данной задачи можно пренебречь).

Кулон первым опубликовал результаты своих исследований по взаимодействию неподвижных точечных зарядов. Он на опыте изучил зависимость сил электрического взаимодействия тел от модулей зарядов этих тел и расстояния между ними. Полученное им соотношение является одним из основных законов электростатики.

В своих опытах Кулон использовал специальный прибор — крутильные весы (рис. 80). Крутильные весы представляют собой два стеклянных цилиндра, внутри которых на тонкой серебряной нити подвешено лёгкое непроводящее коромысло. На одном конце коромысла закреплён проводящий шар 1, а на другом — бумажный противо-

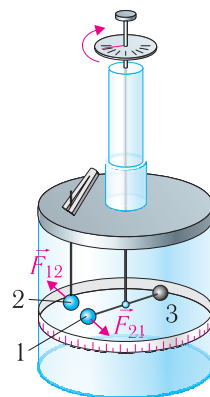


Рис. 80

вес 3. Шар 1 можно заряжать с помощью такого же проводящего шара 2, находящегося на изолирующем стержне, который крепится на крышке нижнего цилиндра. При соприкосновении шара 1 с заряженным шаром 2 заряд распределяется между ними поровну, и шары отталкиваются. По углу закручивания нити, отсчитываемому по шкале, можно определить силу, с которой заряд шара 2 действует на заряд шара 1. Проведя большое количество опытов, Кулон установил, что модуль сил взаимодействия двух заряженных шаров $|\vec{F}_{21}| = |\vec{F}_{12}| = F$

обратно пропорционален квадрату расстояния между ними: $F \sim \frac{1}{r^2}$.

Разряжая шар 2 прикосновением руки, а затем касаясь им уже заряженного шара 1, Кулон смог получить на нём заряды, модуль которых в 2, 4, 8 и т. д. раз меньше первоначального. Он выяснил, что при неизменном расстоянии модуль сил взаимодействия двух неподвижных небольших заряженных тел прямо пропорционален произведению модулей электрических зарядов каждого из них: $F \sim |q_1| \cdot |q_2|$.

Обобщив экспериментальные данные, Кулон сформулировал закон, получивший его имя.

Модули сил взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональны произведению модулей зарядов этих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а сами силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела, являясь силами отталкивания для одноимённых зарядов и силами притяжения для разноимённых.

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (14.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц физических величин, $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули точечных зарядов, r — расстояние между ними.

Силы взаимодействия неподвижных точечных зарядов называют *кулоновскими силами*. В соответствии с третьим законом Ньютона эти силы противоположно направлены $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, а их модули равны (рис. 81).

В СИ коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$ — *электрическая постоянная*.

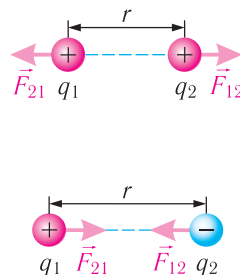


Рис. 81

Опытным путём установили, что силы взаимодействия двух точечных зарядов не изменяются при появлении третьего точечного заряда или любого числа точечных зарядов. В этом случае силы воздействия $\vec{F}_{21}, \vec{F}_{31}, \dots, \vec{F}_{n1}$ каждого из зарядов $q_2, q_3, \dots, q_n$ на заряд q_1 определяют по закону Кулона. Результирующая сила является векторной суммой сил, с которыми каждый из этих зарядов в отдельности воздействует на заряд q_1 (принцип суперпозиции).

Используя принцип суперпозиции и закон Кулона, можно описать электростатическое взаимодействие любой системы зарядов. На рисунке 82 показаны три взаимодействующих между собой точечных электрических заряда: $q_1 > 0, q_2 < 0, q_3 < 0$. Равнодействующей сил, действующих на заряд q_1 со стороны зарядов q_2 и q_3 , является сила $\vec{F}_1$, которая равна векторной сумме сил $\vec{F}_{21}$ и $\vec{F}_{31}$: $\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$. Силы $\vec{F}_{21}$ и $\vec{F}_{31}$ воздействия зарядов q_2 и q_3 на заряд q_1 определяют по закону Кулона.

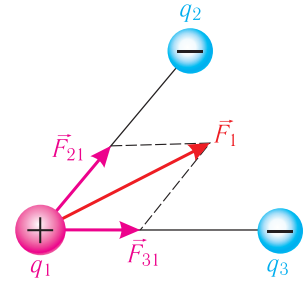


Рис. 82

Закон Кулона, описывающий электростатическое взаимодействие, формально похож на закон всемирного тяготения Ньютона, определяющий силы гравитационного взаимодействия двух тел:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

В обоих случаях модуль сил взаимодействия:

- обратно пропорционален квадрату расстояния между материальными точками;

- прямо пропорционален величинам, характеризующим те свойства тел (материальных точек), которые определяют взаимодействия, — массам в одном случае и электрическим зарядам — в другом.

Для измерения сил электрического и гравитационного взаимодействий учёные использовали похожие по устройству экспериментальные установки.

Однако между силами гравитационного и электростатического взаимодействий существует и важное различие. Ньютоновские силы тяготения — это всегда силы притяжения. Кулоновские же силы взаимодействия зарядов могут быть как силами притяжения (между разноимёнными зарядами), так и силами отталкивания (между одноимёнными зарядами).

Закон Кулона в виде (14.1) справедлив не только для точечных зарядов, но и для заряженных тел сферической формы, заряды которых распределены

равномерно по всему объёму или по поверхности этих тел (при этом r — расстояние между центрами сферических тел).

Как показывают опыты, взаимодействие электрически заряженных тел в вакууме практически не отличается от их взаимодействия в воздухе. Поэтому формулу (14.1) применяют, описывая взаимодействие заряженных тел как в вакууме, так и в воздухе. Если заряженное тело находится в воде, керосине, масле или какой-нибудь другой непроводящей среде, то модуль сил взаимодействия будет меньше, чем в вакууме.



Экспериментальные факты свидетельствуют о том, что воздействие неподвижного в данной инерциальной системе отсчёта точечного заряда на движущийся точечный заряд может быть описано законом Кулона с приемлемой точностью. Так, описание рассеяния α -частиц на ядрах атомов золота в опытах Резерфорда с помощью модели точечного заряда, на который действует кулоновская сила со стороны неподвижного ядра, согласуется с экспериментальными данными в пределах точности последних ($\delta \sim 3 \cdot 10^{-2}$). Модуль скорости движения α -частиц относительно ядра атома золота

$v \approx 1,4 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 0,05c$, где c — скорость распространения света в вакууме.

Два и более *движущихся* в данной инерциальной системе заряда *не могут* характеризоваться *только* кулоновским взаимодействием, так как каждый из них создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует магнитной силой на остальные заряды, движущиеся в нём.



1. Точечный заряд — заряд такого заряженного тела, размеры которого значительно меньше расстояния от этого тела до точки наблюдения и до других тел (т. е. размерами заряженного тела в условиях данной задачи можно пренебречь).

2. Закон Кулона: модули сил взаимодействия двух неподвижных точечных заряженных тел в вакууме прямо пропорциональны произведению модулей зарядов этих тел, обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а сами силы направлены вдоль прямой, соединяющей эти тела, являясь силами отталкивания для одноимённых зарядов и силами притяжения для разноимённых:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$

3. Силы взаимодействия двух точечных зарядов не изменяются при появлении других точечных зарядов. Силы воздействия $\vec{F}_{21}, \vec{F}_{31}, \dots, \vec{F}_{n1}$ каждого из зарядов $q_2, q_3, \dots, q_n$ на заряд q_1 определяют по закону Кулона,

а результирующую силу, действующую на заряд q_1 , находят как векторную сумму сил, с которыми каждый из этих зарядов в отдельности воздействует на заряд q_1 (принцип суперпозиции).

4. Закон Кулона справедлив для неподвижных точечных зарядов и сферических тел с равномерным распределением заряда по поверхности или объёму.

?

1. К какому виду взаимодействий относят взаимодействие неподвижных электрических зарядов (заряженных тел)?

2. Объясните, почему гравитационное и электростатическое взаимодействия не всегда заметны. Приведите примеры, когда такие взаимодействия наблюдаются, и объясните, почему.

3. Заряды каких заряженных тел можно считать точечными?

4. Опишите эксперименты Кулона по исследованию взаимодействия электрических зарядов.

5. Сформулируйте закон Кулона. Каковы границы применимости закона Кулона?

6. Чему равен в СИ коэффициент k ? Каков его физический смысл?

7. Математическая запись закона Кулона напоминает закон всемирного тяготения. В чём различие этих законов? Сравните физические понятия «масса» и «электрический заряд».

8. В чём суть принципа суперпозиции для электрического взаимодействия точечных зарядов?

Примеры решения задач

Пример 1. Две бусинки, электрические заряды которых $q_1 = 40$ нКл и $q_2 = 90$ нКл, закреплены на непроводящем стержне на расстоянии $r = 40$ см друг от друга. Определите: а) где надо поместить третью бусинку, имеющую заряд q_3 , чтобы она оказалась в равновесии; б) каким должен быть заряд q_3 третьей бусинки, чтобы сила электростатического взаимодействия каждой из трёх бусинок с остальными двумя равнялась нулю.

Дано:

$$q_1 = 40 \text{ нКл} = 4,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$q_2 = 90 \text{ нКл} = 9,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 40 \text{ см} = 0,40 \text{ м}$$

$$x \text{ — ? } q_3 \text{ — ?}$$

Решение. а) Третья бусинка, имеющая заряд q_3 , будет находиться в равновесии, если её поместить в некоторую точку A между зарядами q_1 и q_2 на прямой, соединяющей эти заряды (рис. 83). Пусть заряд $q_3 < 0$. Тогда со стороны зарядов q_1 и q_2 на заряд q_3 будут действо-

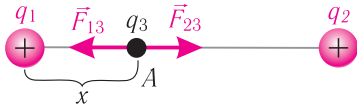


Рис. 83



Рис. 84

вать противоположно направленные кулоновские силы притяжения $\vec{F}_{13}$ и $\vec{F}_{23}$. Согласно второму закону Ньютона эта бусинка будет покоиться, если модули сил F_{13} и F_{23} равны. Тогда, приняв расстояние от заряда q_1 до точки A рав-

ным x , запишем: $k \frac{q_1 |q_3|}{x^2} = k \frac{q_2 |q_3|}{(r-x)^2}$. Так как k и q_3 не равны нулю, то это вы-

ражение можно сократить: $\frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(r-x)^2}$. Извлечём из обеих частей равенства

квадратный корень ($x > 0$, $r - x > 0$): $\frac{\sqrt{q_1}}{x} = \frac{\sqrt{q_2}}{(r-x)}$. Отсюда $x = \frac{\sqrt{q_1} \cdot r}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}}$.

$$x = \frac{\sqrt{4,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}} \cdot 0,40 \text{ м}}{\sqrt{4,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}} + \sqrt{9,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}} = 0,16 \text{ м.}$$

Такое же значение x мы получим, если примем заряд q_3 бусинки положительным (проверьте это самостоятельно).

б) Сила электростатического взаимодействия каждой из трёх бусинок с остальными двумя равна нулю, если, например, третья бусинка притягивает вторую с силой, модуль $|\vec{F}_{32}|$ которой равен модулю силы $|\vec{F}_{12}|$, с какой её отталкивает первая бусинка (рис. 84). При этом заряд третьей бусинки должен быть

отрицательным, т. е. $q_3 < 0$. Тогда $k \frac{q_1 q_2}{r^2} = k \frac{q_2 |q_3|}{(r-x)^2}$. Отсюда $|q_3| = \frac{(r-x)^2}{r^2} q_1$.

$$|q_3| = \frac{(0,24 \text{ м})^2}{(0,40 \text{ м})^2} \cdot 4,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 14 \text{ нКл.}$$

Ответ: $x = 16$ см, расстояние до бусинки с зарядом q_3 не зависит от значения и знака её заряда; если заряд бусинки $q_3 = -14$ нКл, то сила электростатического взаимодействия каждой из трёх бусинок с остальными двумя равна нулю.

Пример 2. Два одинаковых маленьких проводящих шарика массой $m = 20$ мг каждый подвешены в воздухе на лёгких нерастяжимых нитях длиной $l = 0,20$ м, закреплённых в одной точке подвеса. Один из шариков отвели в сторону, сообщили ему заряд $q < 0$ и отпустили. После столкновения шарики разошлись так, что угол между нитями составил $2\alpha = 60^\circ$ (рис. 85). Определите значение заряда, который был сообщён первому шарiku, а также количество избыточных электронов на каждом из шариков после их столкновения.

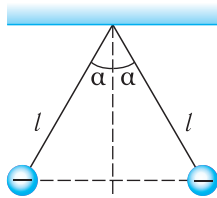


Рис. 85

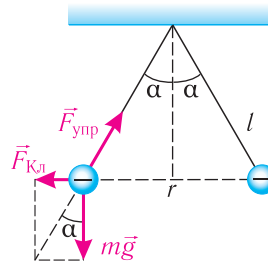


Рис. 86

Дано:

$$m = 20 \text{ мг} = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$$

$$l = 0,20 \text{ м}$$

$$2\alpha = 60^\circ$$

$$q = ?$$

$$N = ?$$

Решение. Воспользуемся законом сохранения электрического заряда. При столкновении двух одинаковых проводящих шариков сообщённый одному из них заряд разделился поровну и на каждом шарике оказался избыточный отрицательный заряд $q_1 = q_2 = \frac{q}{2}$. На каждый шарик действуют сила тя-

жести $\vec{F}_T = m\vec{g}$, сила электростатического взаимодействия $\vec{F}_{Kл}$ и сила упругости нити $\vec{F}_{упр}$ (рис. 86).

После столкновения шарики разошлись и установилось равновесие. Векторная сумма сил, действующих на каждый шарик, стала равной нулю: $m\vec{g} + \vec{F}_{Kл} + \vec{F}_{упр} = \vec{0}$. Модуль силы электростатического взаимодействия

$$F_{Kл} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = \frac{kq^2}{4r^2}. \text{ Поскольку шарики разошлись симметрично относи-}$$

тельно вертикали, проходящей через точку подвеса нитей, то $\frac{r}{2l} = \sin \alpha$ (см.

рис. 86). Следовательно, $F_{Kл} = \frac{kq^2}{16l^2 \sin^2 \alpha}$. Так как $\frac{F_{Kл}}{mg} = \tan \alpha$ (см. рис. 86),

то $\frac{kq^2}{16l^2 \sin^2 \alpha} = mg \operatorname{tg} \alpha$, откуда $|q| = 4l \sin \alpha \sqrt{\frac{mg \operatorname{tg} \alpha}{k}}$.

Примем $k = 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$.

$$|q| = 4 \cdot 0,20 \text{ м} \cdot 0,50 \sqrt{\frac{2,0 \cdot 10^{-5} \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,58}{9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}} = 4,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 45 \text{ нКл}.$$

Количество избыточных электронов на каждом шарике $N = \frac{|q|}{2e}$.

$$N = \frac{4,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 1,4 \cdot 10^{11}.$$

О т в е т: $q = -45 \text{ нКл}$, $N = 1,4 \cdot 10^{11}$.

Упражнение 12

1. Определите модуль сил взаимодействия двух одинаковых неподвижных точечных зарядов $q_1 = q_2 = 9,0 \text{ нКл}$, находящихся на расстоянии $r = 0,30 \text{ м}$ друг от друга в вакууме.

2. Определите, во сколько раз следует увеличить расстояние между двумя неподвижными точечными зарядами, чтобы модуль сил взаимодействия остался прежним при увеличении численного значения одного из зарядов в четыре раза.

3. Два одинаковых маленьких проводящих шарика, заряды которых отличаются в два раза, находятся на расстоянии $r = 50 \text{ см}$. Определите расстояние, на которое необходимо развести шарики после соприкосновения, чтобы модуль сил их взаимодействия остался прежним.

4. На двух одинаковых маленьких шариках массой $m = 40 \text{ г}$ каждый находятся одноимённые заряды, модули которых равны. Расстояние между шариками существенно превышает их размеры. Определите модули зарядов шариков, если кулоновская сила их отталкивания уравнивает силу гравитационного притяжения этих шариков.

5. Точечные заряды $q_1 = 50 \text{ нКл}$ и $q_2 = 80 \text{ нКл}$ закреплены на расстоянии $r = 2,0 \text{ м}$ друг от друга в вакууме. На середине отрезка прямой, соединяющей заряды, находится третий точечный заряд $q_3 = 1,0 \text{ нКл}$. Определите модуль результирующей электростатической силы, действующей на третий заряд. Как направлена эта сила?

6. Небольшой шарик, заряд которого $q_1 = 20$ нКл и масса $m = 60$ мг, подвешен в воздухе на шёлковой нити. После того как на вертикали, проходящей через центр шарика, на расстоянии $r = 15$ см ниже его поместили другой маленький шарик, заряженный разноимённо, модуль силы упругости нити увеличился в два раза. Определите заряд второго шарика.

7. Два маленьких шарика массой $m = 40$ г каждый подвешены в одной точке на нитях длиной $l = 20$ см. Определите, какие одинаковые заряды надо сообщить шарикам, чтобы нити разошлись на угол $\alpha = 60^\circ$.

8*. Три первоначально закреплённых одинаковых точечных заряда $q_1 = q_2 = q_3 = q_0 = 1,0$ нКл расположены в вершинах равностороннего треугольника. Определите, какой точечный заряд нужно поместить в центр треугольника, чтобы вся система находилась в равновесии после освобождения первоначально закреплённых зарядов. Устойчивым или неустойчивым является данное равновесие?

§ 15. Электростатическое поле. Напряжённость и линии напряжённости электростатических полей

Заряженные тела и частицы, которые кратко называют зарядами, взаимодействуют друг с другом. Это подтверждают многочисленные опыты, а закон Кулона позволяет определить силы взаимодействия неподвижных точечных зарядов. Но что является причиной подобного взаимодействия, каков его механизм?

Электростатическое поле. Первым, кто догадался, что «тела действуют друг на друга на расстоянии посредством обращения окружающей среды в состояние напряжения», был выдающийся английский учёный Майкл Фарадей (1791—1867). Обобщая результаты собственных исследований, проведённых с 1832 г. по 1852 г., Фарадей ввёл в физику новое понятие — поле. Математическую завершённость идее Фарадея об изменении состояния пространства вблизи заряженных тел (частиц) и возникновении новой сущности, впоследствии названной электромагнитным полем, придал его гениальный соотечественник и преемник Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879).

Электрический заряд, создающий в окружающем пространстве электрическое поле, называют источником поля и часто обозначают символом Q . Электрическое поле оказывает силовое действие на любой другой заряд q , помещённый в него.

Самая существенная особенность электрического поля — его материальность, т. е. *электрическое поле — вид материи*. В реальности существо-

вания электрического поля можно убедиться по его проявлениям: поле, созданное зарядом, действует с определённой силой на другие заряды, которые в него вносят.

Поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами, называют *электростатическим полем*.

Чтобы исследовать электростатическое поле, создаваемое зарядом Q , поместим в это поле заряд q_0 , называемый пробным. Под *пробным зарядом* понимают заряд, модуль которого достаточно мал ($|q_0| \ll |Q|$) и собственное поле не меняет существенно распределения остальных зарядов, создающих исследуемое поле. Пробный заряд должен быть точечным, чтобы можно было исследовать поле в малых областях пространства. Пробный заряд может быть как положительным, так и отрицательным.

Отметим, что свойство электрического поля, обусловленное присутствием тела с зарядом-источником поля Q , воздействовать некоторой силой проявляется не только в точке, в которой находится пробный заряд q_0 . Это свойство присуще всем точкам поля, создаваемого зарядом Q .

Используя пробный заряд q_0 , можно количественно охарактеризовать электростатическое поле, создаваемое любым заряженным телом, указав модуль и направление силы, действующей на этот заряд q_0 . Удобно пользоваться такой характеристикой электростатического поля, которая не зависит от числового значения пробного заряда. Ею является напряжённость.

Напряжённость электростатического поля. Если в произвольно выбранную точку A электростатического поля, созданного зарядом Q , внести пробный заряд q_{01} , то поле подействует на него с определённой силой $\vec{F}_1$. Поместим поочерёдно в эту же точку поля другие пробные заряды $q_{02}, q_{03}, q_{04} \dots$, значения которых в 2, 3, 4 и т. д. раз отличаются от значения заряда q_{01} . Опыт показывает, что модули сил $F_1, F_2, F_3, F_4 \dots$, действующих со стороны электростатического поля, созданного зарядом Q , на пробные заряды $q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{04} \dots$, прямо пропорциональны значениям этих зарядов.

Таким образом, отношение силы, действующей на помещённый в некоторую точку поля пробный заряд, к значению этого заряда для данной точки поля остаётся неизменным. Это отношение является силовой характеристикой электростатического поля, получившей название *напряжённость*.

Напряжённостью $\vec{E}$ электростатического поля в любой его точке называют физическую векторную величину, характеризующую силовое действие поля на вносимые в него заряды и равную отношению силы $\vec{F}$,

с которой поле действует на пробный заряд q_0 , находящийся в выбранной точке, к значению этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (15.1)$$

Из выражения (15.1) следует, что единицей напряжённости электростатического поля в СИ является ньютон на кулон $\left(\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}\right)$. В СИ широко используют другое название этой единицы — вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$. Покажите самостоятельно, что $1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Выражение (15.1) позволяет определить силу, действующую на точечный заряд q , помещённый в электростатическое поле напряжённостью $\vec{E}$, созданное другим точечным зарядом Q :

$$\vec{F} = \vec{E}q.$$

Напряжённость поля, как и сила, величина векторная. Направление напряжённости поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный электрический заряд. Напряжённость в любой точке электростатического поля направлена вдоль прямой, соединяющей эту точку и точечный заряд, создающий поле. Напряжённость поля, созданного точечным положительным зарядом $Q > 0$, направлена от заряда, а напряжённость поля, созданного точечным отрицательным зарядом $Q < 0$, — к заряду (рис. 87).

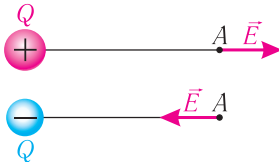


Рис. 87

Напряжённость поля, создаваемого точечным зарядом. Найдём напряжённость электростатического поля, созданного точечным зарядом, модуль которого $|Q|$. Поместим в некоторую точку поля положительный пробный заряд q_0 . Согласно закону Кулона модуль силы, действующей на пробный заряд,

$F = k \frac{|Q| \cdot q_0}{r^2}$, где r — расстояние между зарядом Q , создающим поле, и точкой, в которую помещён пробный заряд q_0 . Подставляя выражение для модуля кулоновской силы в формулу для модуля напряжённости поля, получим:

$$E = \frac{F}{q_0} = k \frac{|Q| \cdot q_0}{q_0 r^2} = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Модуль напряжённости поля, создаваемого равномерно заряженной сферой, заряд которой Q , в точках на её поверхности и вне сферы на расстоянии r от её центра определяют по формуле $E = k \frac{|Q|}{r^2}$. В точках, находящихся внутри сферы, как мы увидим дальше, $\vec{E} = \vec{0}$.

Напряжённость электростатического поля, создаваемого равномерно заряженной бесконечной плоскостью, одинакова во всех точках полупространства с каждой стороны от плоскости (при этом $\vec{E}_1 = -\vec{E}_2$), а её модуль

$$|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2| = E = \frac{q}{2\epsilon_0 S},$$

где S — площадь некоторого участка плоскости, q — заряд этого участка.

Принцип суперпозиции электрических полей. Если заряженные тела, создающие электростатические поля, не меняют своего состояния (распределения электрических зарядов) в зависимости от присутствия или отсутствия других тел, то напряжённость $\vec{E}$ результирующего поля, образованного наложением рассматриваемых полей в некоторой точке:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n,$$

где $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$ — напряжённости полей в указанной точке, создаваемые 1-м, 2-м, 3-м, ..., n -м заряженным телом в отсутствие других (как заряженных, так и незаряженных) тел.

Самым простым примером проявления принципа суперпозиции являются электростатические поля, созданные разными точечными зарядами: **если в определённой точке пространства электростатические поля создаются системой точечных зарядов, напряжённости которых в указанной точке $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$, то напряжённость $\vec{E}$ результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности.**

На рисунке 88 показано, как можно определить напряжённость результирующего поля, созданного двумя точечными электрическими зарядами противоположных знаков $q_1 < 0$ и $q_2 > 0$, в точках A и B .

Напряжённости $\vec{E}_{1A}$ и $\vec{E}_{2A}$ полей, созданных зарядами q_1 и q_2 , в точке A , направлены вдоль

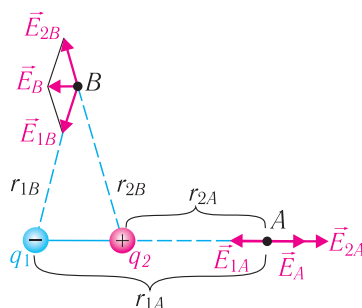


Рис. 88

прямой, соединяющей заряды, в противоположные стороны. Напряжённость $\vec{E}_A$ результирующего поля в точке A равна векторной сумме напряжённостей $\vec{E}_{1A}$ и $\vec{E}_{2A}$ и также направлена вдоль прямой, соединяющей заряды. Напряжённость $\vec{E}_B$ результирующего поля в точке B , находящейся вне прямой, соединяющей заряды, равна векторной сумме напряжённостей $\vec{E}_{1B}$ и $\vec{E}_{2B}$. Определить её можно по правилу параллелограмма (см. рис. 88).

Аналогично определяют напряжённость и для электростатического поля системы проводящих concentрических заряженных сфер.

Линии напряжённости электростатического поля. Чтобы наглядно отображать распределение поля в пространстве, Фарадеем в 1845 г. был предложен способ изображения электрических полей в виде воображаемых линий, называемых линиями напряжённости (силовыми линиями).

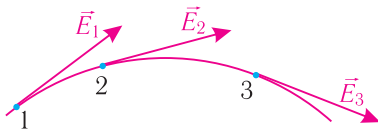


Рис. 89

Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля в той же точке (т. е. с направлением электростатической силы, действующей на положительный заряд) (рис. 89).

Очевидно, что через любую точку поля, в которой $\vec{E} \neq \vec{0}$, можно провести одну и только одну линию напряжённости. В каждой такой точке напряжённость имеет вполне определённое направление.

На рисунке 90, а показаны линии напряжённости полей, образованных зарядами, равномерно распределёнными по поверхности уединённых проводящих шариков. Направление каждой стрелки на рисунке 90, а совпадает с направлением напряжённости поля. Линии напряжённости в первом случае

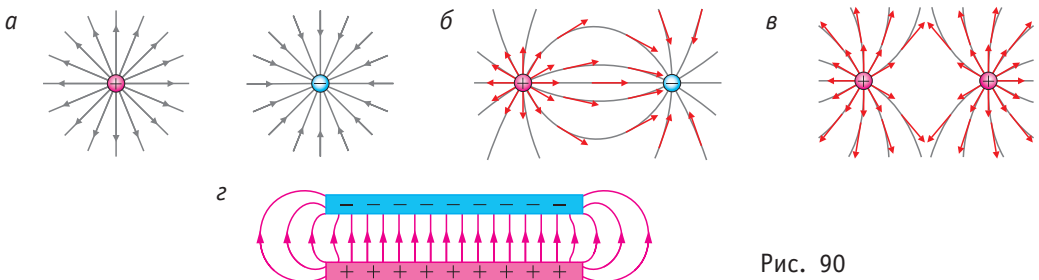


Рис. 90

направлены от положительного заряда в бесконечность, а во втором — из бесконечности к отрицательному заряду и оканчиваются на нём. В электростатическом поле линии напряжённости начинаются и оканчиваются на электрических зарядах даже тогда, когда одним своим концом уходят в бесконечность, где и находятся недостающие на рисунке заряды.

На рисунке 90, б показаны линии напряжённости электростатического поля, образованного двумя разноимёнными зарядами, модули которых одинаковые, находящимися на проводящих шариках. Стрелки показывают направления напряжённости поля в различных его точках.

На рисунке 90, в приведены линии напряжённости электростатического поля двух одинаково заряженных шариков.

На рисунке 90, г изображено поле, созданное зарядами противоположных знаков, модули которых одинаковые, находящимися на двух плоских металлических пластинах, длина которых много больше расстояния между ними. Линии напряжённости такого поля параллельны друг другу за исключением пространства вблизи краёв пластин и вне области их перекрытия. Электростатическое поле в центральной области между разноимённо заряженными металлическими пластинами является примером *однородного поля*. Электростатические поля, изображённые на рисунке 90, а, б, в, являются неоднородными, так как или модуль, или направление (или и то и другое) напряжённости в разных точках поля отличаются.

Электростатическое поле, напряжённость которого в любой его точке одинакова, называют однородным электростатическим полем.

Линии напряжённости электростатического поля не прерываются в пространстве (при отсутствии в нём других зарядов), никогда не пересекаются и не касаются друг друга.

Чтобы линии напряжённости отображали не только направление, но и модуль напряжённости поля, на рисунках их условились проводить с определённой густотой. Густота линий напряжённости в пространстве зависит от модуля напряжённости поля: линии напряжённости идут гуще там, где модуль напряжённости поля больше, и реже там, где он меньше. В однородном электростатическом поле густота линий напряжённости не меняется. Картину линий напряжённости принято строить так, чтобы она по возможности отображала симметрию изображаемого электростатического поля. Количество линий напряжённости, началом или концом которых служит данный заряд, пропорционально значению этого заряда (рис. 91).

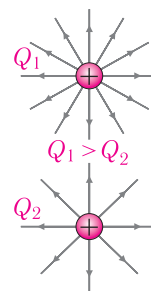


Рис. 91



1. Поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами, называют электростатическим полем.

2. Напряжённостью электростатического поля в любой его точке называют физическую векторную величину, характеризующую силовое действие поля на вносимые в него заряды и равную отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, находящийся в выбранной точке, к значению этого заряда:

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

3. Модуль напряжённости поля, создаваемого в вакууме или воздухе точечным зарядом, прямо пропорционален модулю этого заряда и обратно пропорционален квадрату расстояния между зарядом и точкой, в которой определяют значение напряжённости:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

4. Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля. Линии напряжённости начинаются на положительных зарядах и оканчиваются на отрицательных, нигде не прерываются в пространстве, не содержащем других зарядов, не пересекаются и не касаются друг друга.

5. Электростатическое поле, напряжённость которого в любой его точке одинакова, называют однородным электростатическим полем.



1. Какое поле называют электростатическим? Каковы основные его особенности?

2. Что называют напряжённостью электростатического поля?

3. Как рассчитать напряжённость электростатического поля точечного заряда в некоторой точке?

4. Как изменится напряжённость поля точечного заряда Q , если: а) расстояние r от заряда до точки наблюдения увеличить вдвое; б) заряд Q увеличить вдвое, а расстояние r от заряда до точки наблюдения уменьшить вдвое?

5. Пробный заряд помещают в разные точки электростатического поля, созданного зарядом Q (рис. 92). В какой точке модуль напряжённости поля будет наибольшим; наименьшим? В каких точках он одинаков?

6. В чём заключается принцип суперпозиции полей?

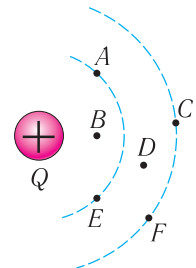


Рис. 92

7. Что называют линиями напряжённости электростатического поля? Каковы их особенности?

8. Как направлены линии напряжённости электростатического поля заряда в зависимости от его знака? системы двух зарядов (одноимённых и разноимённых)?

9. Какое электростатическое поле называют однородным? Приведите примеры.

10*. Гравитационное поле Земли также можно характеризовать напряжённостью.

Сравните выражения для электрической силы $\vec{F}_{эл} = q\vec{E}$ и силы тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$. Чему равна напряжённость гравитационного поля Земли вблизи её поверхности?

Примеры решения задач

Пример 1. Два неподвижных точечных заряда $q_1 = 6,70$ нКл и $q_2 = -13,3$ нКл находятся в воздухе на расстоянии $r = 5,00$ см друг от друга. Определите модуль напряжённости электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 3,00$ см от положительного заряда и $r_2 = 4,00$ см от отрицательного.

Дано:

$$q_1 = 6,70 \text{ нКл} = 6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -13,3 \text{ нКл} = -1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$r = 5,00 \text{ см} = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_1 = 3,00 \text{ см} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$r_2 = 4,00 \text{ см} = 4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$E = ?$

Решение. Согласно принципу суперпозиции напряжённость результирующего поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рис. 93) определяют по правилу параллелограмма. Здесь $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ — напряжённости полей, создаваемых точечными зарядами q_1 и q_2 в данной точке. Из условия задачи и теоремы, обратной

теореме Пифагора, следует, что угол между $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ прямой. Модуль напряжённости E результирующего поля найдём по теореме Пифагора: $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$. Так

как заряды q_1 и q_2 точечные, то $E_1 = k \frac{q_1}{r_1^2}$, $E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2}$.

С учётом этого $E = k \sqrt{\left(\frac{q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{q_2}{r_2^2}\right)^2}$.

$$E = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \sqrt{\left(\frac{6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}\right)^2 + \left(\frac{1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{(4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2}\right)^2} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Ответ: $E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

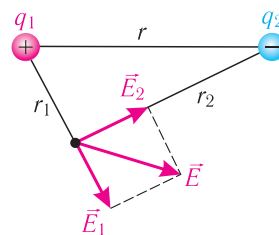


Рис. 93

Пример 2. Первоначально неподвижный шарик массой $m = 10$ г и зарядом $q = 10$ нКл начинает падать с ускорением, модуль которого $a = 8,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$, в вертикальном однородном электростатическом поле. Определите напряжённость этого поля. Механическим сопротивлением среды пренебречь.

Дано:

$$m = 10 \text{ г} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$$

$$q = 10 \text{ нКл} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$$

$$a = 8,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$\vec{E} \text{ — ?}$$

Решение. В начальный момент на шарик действуют сила тяжести $\vec{F}_T = m\vec{g}$ со стороны гравитационного поля Земли и электрическая сила $\vec{F}_{\text{эл}} = q\vec{E}$ со стороны однородного электростатического поля. Модуль ускорения, с которым начинает падать положительно заряженный

шарик, меньше модуля ускорения свободного падения $g = 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$. Следовательно, электрическая сила $\vec{F}_{\text{эл}}$ направлена вертикально вверх и совпадает по направлению с напряжённостью электростатического поля (рис. 94). Модуль напряжённости определим, используя второй закон Ньютона: $m\vec{g} + \vec{F}_{\text{эл}} = m\vec{a}$. В проекции на вертикальную ось Oy (см. рис. 94) это уравнение имеет вид $mg - qE = ma$. Отсюда $E = \frac{m(g-a)}{q}$.

$$E = \frac{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \left(9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} - 8,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right)}{1,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}} = 1,8 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1,8 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}.$$

Ответ: напряжённость электростатического поля направлена вертикально вверх и её модуль $E = 1,8 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$.

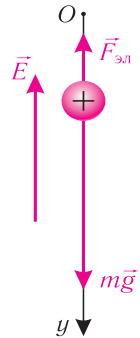


Рис. 94

Упражнение 13

1. В однородное электростатическое поле, модуль напряжённости которого $E = 160 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, помещают заряд $q = 4,00$ нКл. Определите, чему равен модуль силы, действующей на заряд со стороны электростатического поля.

2. Определите модуль точечного заряда, находящегося в воздухе, если на расстоянии $r = 1,0$ см от заряда модуль напряжённости поля $E = 3,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

3. Два положительных точечных заряда находятся на расстоянии $r_0 = 10$ см друг от друга. В точке, расположенной на прямой, соединяющей заряды, на

расстоянии $r_1 = 8,0$ см от первого заряда модуль напряжённости результирующего электростатического поля равен нулю. Определите отношение зарядов $\frac{q_1}{q_2}$.

4. Пылинка массой $m = 2,5 \cdot 10^{-8}$ г имеет заряд $q = 5,0 \cdot 10^{-12}$ Кл. Определите напряжённость вертикального однородного электростатического поля, в котором пылинка будет находиться в равновесии.

5. Шарик массой $m = 0,040$ г и зарядом $q = 34$ пКл подвешен на шёлковой нити. Определите, на какой угол от вертикали отклонится нить с шариком, если шарик поместить в однородное горизонтальное электростатическое поле, модуль напряжённости которого $E = 1,01 \cdot 10^6 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

6. Расстояние между точечными зарядами $q_1 = 3,2 \cdot 10^{-9}$ Кл и $q_2 = -3,2 \cdot 10^{-9}$ Кл составляет $r_0 = 12$ см. Определите напряжённость электростатического поля в точках, удалённых от обоих зарядов на расстояние $r = 8,0$ см.

7. Три одинаковых отрицательных точечных заряда, модули которых $|q| = 2,0$ нКл, расположены в вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника. Определите напряжённость электростатического поля в точке, находящейся на середине гипотенузы, длина которой $a = 8,0$ см.

8*. Экспериментальные факты свидетельствуют о том, что воздействие неподвижных в данной инерциальной системе отсчёта точечных зарядов (создаваемого ими электростатического поля) на движущийся точечный заряд может быть описано законом Кулона с приемлемой точностью. Определите ускорение, с которым начнёт двигаться частица массой $m = 2,0$ мг и зарядом $q = 9,5$ пКл в однородном горизонтально направленном электростатическом поле, модуль напряжённости которого $E = 8,0 \cdot 10^5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Какой путь пройдёт эта частица за первую секунду движения?

§ 16. Потенциальность электростатического поля. Потенциал

Электростатическое поле, действуя на находящиеся в нём заряды с определённой силой, может их перемещать. Из механики вы знаете, что при перемещении тела действующая на него сила совершает работу. Выясним, от чего зависит работа силы по перемещению электрического заряда в электростатическом поле.

Работа силы однородного электростатического поля по перемещению электрического заряда. В общем случае работа сил электрического поля при перемещении заряда зависит как от его начального и конечного положений, так и от вида траектории, по которой движется заряд.

Однако электростатическое поле имеет важную особенность. Работа сил этого поля при перемещении заряда между двумя точками зависит только от положения этих точек и не зависит от вида траектории. Такой же особенностью обладает и гравитационное поле. Физические поля, работа сил которых не зависит от формы траектории, называют *потенциальными* (или консервативными). Покажем, что электростатическое поле потенциально.

Пусть положительный пробный заряд q_0 перемещают в однородном электростатическом поле напряжённостью $\vec{E}$ из точки B в точку C вдоль линии напряжённости рассматриваемого поля (рис. 95, а). При этом сила $\vec{F}$, с которой поле действует на заряд q_0 , совершает работу. В скалярном виде выражение для работы имеет вид $A = F\Delta r \cos \alpha$, где α — угол между силой $\vec{F}$ и перемещением $\Delta \vec{r}$ заряда. Модуль электрической силы $F = q_0 E$, $\cos \alpha = 1$ (направления силы и перемещения заряда совпадают), а $\Delta r = d$, где d — расстояние между точками B и C . Тогда работа силы однородного электростатического поля по перемещению заряда:

$$A = q_0 E d. \quad (16.1)$$

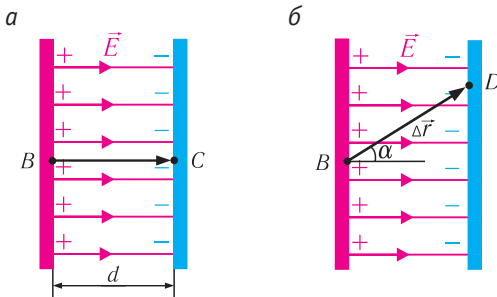


Рис. 95

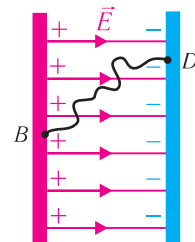


Рис. 96

Если заряд перемещают по прямой из точки B в точку D под углом α к направлению напряжённости поля $\vec{E}$ (рис. 95, б), то $\Delta r \cos \alpha = d$. Работа силы поля по перемещению заряда и в этом случае:

$$A_{BD} = F\Delta r \cos \alpha = q_0 E d.$$

Очевидно, что для перемещения заряда в обратном направлении (из точки D в точку B) внешней силе требуется, преодолевая силу поля, совершить работу, минимальное значение которой будет таким же: $A_{DB}^{\text{внеш}} = A_{BD}$, поэтому $A_{BD} = -A_{DB}$. Следовательно, когда заряд возвращается в начальную точку, т. е. при движении заряда по замкнутой траектории, работа силы поля равна нулю.



Предположим, что перемещение заряда q_0 из точки B в точку D происходит в однородном электростатическом поле напряжённостью $\vec{E}$ по криволинейной траектории (рис. 96). В этом случае траекторию можно разбить на такие малые участки, чтобы каждый из них можно было считать прямолинейным. Если алгебраически просуммировать работы силы на каждом из этих участков, то получим:

$$A = q_0 E (\Delta d_1 + \Delta d_2 + \Delta d_3 + \dots + \Delta d_n) = q_0 E d,$$

где $\Delta d_i = \Delta r_i \cos \alpha_i$, Δr_i — модуль перемещения на i -м малом участке траектории, α_i — угол между направлениями перемещения $\Delta \vec{r}_i$ и напряжённости $\vec{E}$ поля ($i = 1, 2, 3, \dots, n$).

Таким образом, *работа силы однородного электростатического поля по перемещению заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории, т. е. однородное электростатическое поле потенциально.*

Воспользовавшись законом сохранения энергии, можно показать, что любое электростатическое поле является потенциальным. Это означает, что электростатическое и гравитационное поля имеют похожие свойства, определяемые их потенциальным характером. Применительно к электростатическому полю эти свойства выражаются в следующем:

а) Точечный электрический заряд, находящийся в любой точке электростатического поля, обладает потенциальной энергией взаимодействия с этим полем, значение которой определяют относительно произвольно выбираемой нулевой точки. В нулевой точке потенциальную энергию заряда в поле принимают равной нулю. *Потенциальная энергия взаимодействия точечного заряда с электростатическим полем равна работе, которую совершили бы силы поля при перемещении данного заряда из указанной точки поля в нулевую точку.*

б) *Работа сил электростатического поля по перемещению электрического заряда из начальной точки 1 в конечную точку 2 равна приращению (изменению) потенциальной энергии заряда в поле, взятому со знаком минус, или же убыли потенциальной энергии:*

$$A_{12} = -\Delta W_{n12} = -(W_{n2} - W_{n1}) = W_{n1} - W_{n2}, \quad (16.2)$$

где W_{n1} и W_{n2} — потенциальные энергии перемещаемого заряда в начальной и конечной точках электростатического поля.

Следует подчеркнуть, что потенциальная энергия — это *энергия взаимодействия*, и её необходимо относить не к заряженной частице или телу, а к системе в целом. В частности, для заряженной частицы (тела), находящейся в электростатическом поле, это потенциальная энергия взаимодействия заряженной частицы с полем, т. е. с другими заряженными частицами и (или) телами, являющимися источниками этого поля. Кратко это принято формулировать так: потенциальная энергия заряда в поле.

Знак «минус» в выражении (16.2) означает, что если сила электростатического поля совершает положительную работу (подобно силе гравитационного поля Земли при падении камня), то потенциальная энергия заряженного тела в поле уменьшается: $\Delta W_{\text{п}} < 0$. При этом согласно закону сохранения энергии под воздействием только сил электростатического поля (другие силы

отсутствуют) увеличивается кинетическая энергия тела: $\frac{mv_2^2}{2} > \frac{mv_1^2}{2}$. На этом

основано ускорение заряженных частиц электростатическим полем. Если работа сил электростатического поля отрицательна (подобно работе силы гравитационного поля при движении камня, брошенного вверх), то потенциальная энергия заряда в поле увеличивается: $\Delta W_{\text{п}} > 0$. При этом кинетическая энергия заряженного тела при отсутствии неэлектростатических сил уменьшается:

$$\frac{mv_2^2}{2} < \frac{mv_1^2}{2}.$$

Потенциал электростатического поля как его энергетическая характеристика. Из выражений (16.1) и (16.2) следует, что приращение (изменение) потенциальной энергии заряда в однородном электростатическом поле при его перемещении из точки 1 в точку 2 поля пропорционально значению этого заряда. Как свидетельствуют результаты многочисленных экспериментов, эта пропорциональность сохраняется и для неоднородного электростатического поля. После выбора точки поля, в которой потенциальная энергия заряда принята равной нулю, значения потенциальной энергии заряда во всех остальных точках поля становятся *однозначно определяемыми* формулой (16.2). Если в произвольно выбранную точку электростатического поля поочерёдно вносить пробные заряды $q_{01}, q_{02}, q_{03}, q_{04} \dots$, значения которых отличаются в 2, 3, 4 и т. д. раз, то потенциальные энергии $W_{\text{п}1}, W_{\text{п}2}, W_{\text{п}3}, W_{\text{п}4} \dots$ этих зарядов будут прямо пропорциональны их значениям.

Таким образом, отношение потенциальной энергии пробного заряда в поле к значению этого заряда для данной точки поля остаётся неизменным. Это отношение является энергетической характеристикой электростатического поля, получившей название *потенциал*.

Потенциалом φ электростатического поля в данной точке пространства называют физическую скалярную величину, характеризующую энергетическое состояние поля в данной точке пространства и равную отношению потенциальной энергии $W_{\text{п}}$ точечного (пробного) заряда q_0 , помещённого в данную точку поля, к значению этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_{\text{п}}}{q_0}. \quad (16.3)$$

Поскольку потенциальная энергия заряда в электростатическом поле зависит от выбора нулевой точки, то эта зависимость сохраняется и для потенциала. Если принять, что на бесконечно большом расстоянии от источника поле отсутствует, т. е. потенциальная энергия системы «заряд — электростатическое поле» на бесконечности равна нулю, то потенциал поля в данной точке можно определить следующим образом:

$$\varphi_1 = \frac{W_{\text{п1}}}{q_0} = \frac{A_{1 \rightarrow \infty}}{q_0}.$$

Потенциал электростатического поля в данной точке численно равен работе, которую совершают силы поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки в бесконечность.

За единицу потенциала в СИ принят вольт (В). Единица названа в честь итальянского учёного Алессандро Вольты (1745—1827), внёсшего большой вклад в изучение электрических явлений. 1 В — потенциал такой точки электростатического поля, в которой заряд 1 Кл обладал бы потенциальной энергией 1 Дж.

Потенциал φ электростатического поля точечного заряда q на расстоянии r от него в вакууме или в воздухе определяют соотношением

$$\varphi = k \frac{q}{r}. \quad (16.4)$$

Знак заряда-источника поля определяет знак потенциала этого поля.

Потенциал поля, создаваемого равномерно заряженной сферой радиусом R , заряд которой q , в вакууме или в воздухе в точках вне сферы на расстоянии $r > R$ от её центра определяют по формуле $\varphi = k \frac{q}{r}$. В точках, находящихся на поверхности и внутри сферы, $\varphi = k \frac{q}{R}$.

Для потенциала выполняется *принцип суперпозиции*: если поле создано системой n точечных зарядов, то потенциал φ такого поля в любой точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов полей в этой же

точке пространства, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n. \quad (16.5)$$



Геометрическое место точек в электростатическом поле, потенциалы которых одинаковы, называют *эквипотенциальной поверхностью*.

Используя эквипотенциальные поверхности, можно представлять графически электростатические поля. Через каждую точку поля проходят только одна линия напряжённости и одна эквипотенциальная поверхность. В каждой точке электростатического поля линия напряжённости и эквипотенциальная поверхность взаимно перпендикулярны (рис. 97). Представление электростатического поля с помощью эквипотенциальных поверхностей, как и термин «потенциал», ввёл немецкий учёный К. Ф. Гаусс в 1840 г.

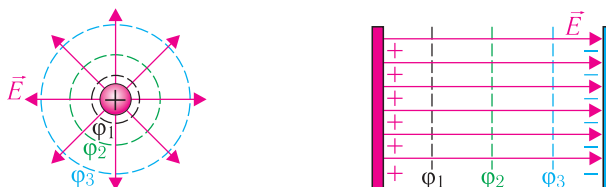


Рис. 97



1. Работа сил электростатического поля по перемещению заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории. Работа сил поля по перемещению заряда по замкнутой траектории равна нулю. Электростатическое поле потенциально.

2. Работа силы однородного электростатического поля по перемещению заряда

$$A = qEd.$$

3. Работа сил электростатического поля по перемещению заряда из начальной точки 1 в конечную точку 2 равна приращению (изменению) потенциальной энергии заряда в этом поле, взятому со знаком минус, или же убыли потенциальной энергии:

$$A_{12} = -\Delta W_{n12} = -(W_{n2} - W_{n1}) = W_{n1} - W_{n2}.$$

4. Потенциалом электростатического поля в данной точке пространства называют физическую скалярную величину, характеризующую энергетическое состояние поля в данной точке пространства и равную отношению потенциальной энергии точечного (пробного) заряда, помещённого в данную точку поля, к значению этого заряда:

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

5. Если поле создано системой точечных зарядов, то его потенциал в данной точке пространства равен алгебраической сумме потенциалов полей в этой точке, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n.$$

?

1. Как определить работу силы однородного электростатического поля по перемещению электрического заряда?
2. Как вы понимаете утверждение «электростатическое поле потенциально»? Как связана работа сил электростатического поля по перемещению электрического заряда с изменением потенциальной энергии заряда в этом поле?
3. Докажите, что работа сил электростатического поля по перемещению заряда по замкнутой траектории равна нулю.
4. В чём проявляется сходство электростатического и гравитационного полей?
5. Какие две физические величины характеризуют электростатическое поле в любой его точке?
6. Что называют потенциалом электростатического поля?
7. Положительно заряженная частица перемещается под действием только сил электростатического поля на некоторое расстояние. В какой точке траектории движения частицы — начальной или конечной — потенциал поля выше, если модуль её скорости: а) возрастает; б) убывает?
8. Отрицательно заряженная частица перемещается под действием только сил электростатического поля на некоторое расстояние. В какой точке траектории движения частицы — начальной или конечной — потенциал поля выше?
9. Чему равен потенциал электростатического поля точечного заряда q на расстоянии r от него?
10. Чему равен потенциал электростатического поля равномерно заряженной сферы радиусом R на расстоянии r от её центра, если: а) $r \leq R$; б) $r > R$, а заряд сферы q ?
11. Как определить потенциал электростатического поля, созданного несколькими точечными зарядами?

Пример решения задачи

Электрон, двигаясь со скоростью, модуль которой $v_1 = 4,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, попадает в однородное электростатическое поле, направление линий напряжённости которого совпадает с направлением его скорости. Пройдя расстояние $d = 2,0$ см, электрон начинает двигаться в обратном направлении. Определите модуль напряжённости электростатического поля. Как изменилась потенциальная энергия взаимодействия электрона с полем к моменту перемены направления движения? Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дано:

$$v_1 = 4,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_2 = 0,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$d = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

E — ?

$\Delta W_{\text{п}}$ — ?

Решение. До изменения направления движения сила однородного электростатического поля совершает отрицательную работу по торможению электрона:

$$A = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = -\frac{m_e v_1^2}{2}.$$

Эту работу также можно определить по формуле $A = eEd$.

$$\text{Значит, } -\frac{m_e v_1^2}{2} = eEd. \text{ Тогда } E = \frac{m_e v_1^2}{2|e|d}.$$

$$E = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6 \cdot 10^{11} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 23 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Согласно закону сохранения энергии полная энергия системы «электрон—поле» остаётся неизменной, т. е. $\Delta W_{\text{п}} + \Delta W_{\text{к}} = 0$. Следовательно,

$\Delta W_{\text{п}} = -\left(\frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2}\right) = \frac{m_e v_1^2}{2}$, т. е. потенциальная энергия электрона в поле возрастает на величину

$$\Delta W_{\text{п}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1,6 \cdot 10^{11} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2} = 7,3 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}.$$

Ответ: $E = 23 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, $\Delta W_{\text{п}} = 7,3 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$.

Упражнение 14

1. Зависит ли работа сил электростатического поля от траектории движения заряда? Сравните работу сил электростатического поля, образованного заряженными пластинами, при перемещении заряда q по контуру A и контуру B (рис. 98).

2. Отрицательный заряд, модуль которого $|q| = 0,50 \text{ нКл}$, переместили в однородном электростатическом поле, модуль напряжённости которого

$E = 2,0 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$, на расстояние $d = 10 \text{ см}$ в направлении

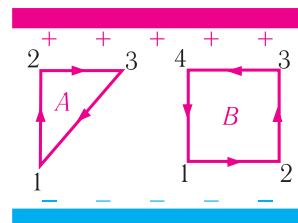


Рис. 98

линий напряжённости. Определите работу силы поля, совершённую при перемещении заряда, и изменение потенциальной энергии взаимодействия заряда с полем.

3. Точечный заряд $q = 5,0$ нКл перемещают в однородном электростатическом поле, модуль напряжённости которого $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Перемещение, модуль которого $\Delta r = 8,0$ см, образует угол $\alpha = 60^\circ$ с направлением линий напряжённости поля. Определите работу силы поля, изменения потенциальной и кинетической энергий заряда, если внешняя сила обеспечивает только прямолинейность перемещения заряда.

4. Работа, совершённая силами электростатического поля при переносе заряда $q = 2,40$ нКл из бесконечности в некоторую точку поля, $A = 72$ нДж. Определите потенциал этой точки поля. Что изменится, если работу по переносу первоначально неподвижного заряда совершают внешние силы против сил электростатического поля? Минимальное значение работы внешних сил $A_{\text{вн}} = 72$ нДж.

5. Модули напряжённости двух точек поля, создаваемого неподвижным точечным зарядом, отличаются в девять раз. Определите, во сколько раз отличаются потенциалы в этих точках поля.

6. Электростатическое поле создано находящимися на расстоянии $r = 80$ см друг от друга двумя разноимёнными зарядами, модули которых $|q_1| = |q_2| = 6,4$ нКл. Определите модуль напряжённости и потенциал в средней точке отрезка, соединяющего эти заряды.

7. В двух вершинах равностороннего треугольника со стороной длиной $a = 25$ см находятся два заряда, модули которых $|q_1| = |q_2| = 5,0$ нКл. Определите потенциал поля в третьей вершине треугольника, если: а) оба заряда положительные; б) оба заряда отрицательные; в) заряды противоположных знаков.

8. Электрон и протон из состояния покоя ускорятся в одном и том же однородном электростатическом поле до скоростей, модули которых значительно меньше скорости света. Определите отношение модулей скоростей электрона и протона после прохождения одного и того же расстояния. Масса электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг, масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

9*. Два противоположных по знаку точечных заряда, модули которых равны, находятся в воздухе. В точке на прямой, соединяющей заряды, отстоящей на расстояния $r_1 = 10,0$ мм и $r_2 = 30,0$ мм от зарядов, потенциал электростатического поля $\varphi = 75,0$ мВ. Определите модуль напряжённости поля в этой точке.

§ 17. Разность потенциалов электростатического поля. Напряжение. Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля

Поскольку потенциальная энергия любой системы тел, взаимодействующих посредством потенциальных сил, зависит от выбора нулевой точки (нулевого уровня), то до осуществления такого выбора потенциальная энергия системы может быть определена только с точностью до некоторой постоянной величины. Но изменение потенциальной энергии не зависит от значения этой постоянной величины и однозначно характеризует процесс перехода системы из одного состояния в другое. Это относится и к изменению потенциальной энергии заряженной частицы (заряда) в электростатическом поле.

Разность потенциалов. Понятие потенциала существенно для количественного описания электростатического поля наряду с его напряжённостью. Перемещение заряженных частиц в электростатическом поле, сопровождаемое изменением их потенциальной энергии, характеризуют, используя понятие «разность потенциалов». Как и приращение (изменение) потенциальной энергии, разность потенциалов не зависит от выбора нулевой точки.

Разностью потенциалов U_{12} между двумя точками электростатического поля называют физическую скалярную величину, равную отношению работы A_{12} , совершаемой силой поля при перемещении пробного заряда q_0 из начальной точки 1 в конечную точку 2, к значению перемещаемого заряда:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \frac{W_{п1} - W_{п2}}{q_0} = \frac{\varphi_1 q_0 - \varphi_2 q_0}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (17.1)$$

Разность потенциалов определяется убылью потенциальной энергии перемещаемого в поле единичного положительного заряда.

Противоположную по знаку разности потенциалов величину называют приращением (изменением) потенциала: $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = -(\varphi_2 - \varphi_1) = -\Delta\varphi_{12}$.

За единицу разности потенциалов в СИ принимают вольт (В). 1 В — разность потенциалов U_{12} таких двух точек поля, для которых при перемещении заряда 1 Кл из точки 1 в точку 2 сила, действующая на заряд со стороны поля, совершила бы работу 1 Дж.

Потенциал проводника можно измерить электрометром. Для этого проводник соединяют со стрелкой электрометра, корпус которого заземляют. Откло-

нение стрелки электрометра покажет наличие разности потенциалов между проводником и Землёй. Приняв потенциал Земли равным нулю, можно считать, что электрометр измеряет потенциал проводника.

Если имеются два заряженных проводника, то, соединив один из них со стрелкой, а другой с корпусом электрометра, измеряют разность потенциалов между заряженными проводниками.

Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля. Термин «напряжение» ввёл в 1792 г. Вольта. Для электростатических полей понятия «электрическое напряжение» и «разность потенциалов» тождественны.

Работа, совершаемая силами однородного электростатического поля напряжённостью $\vec{E}$ при перемещении пробного положительного заряда q_0 из точки 1 с потенциалом φ_1 в точку 2 с потенциалом $\varphi_2 < \varphi_1$, может быть определена в соответствии с выражением (17.1)

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

а в соответствии с выражением (16.1)

$$A_{12} = q_0 E d,$$

где d — модуль перемещения заряда вдоль линии напряжённости электростатического поля.

Приравнявая соответствующие части равенств, найдём выражение, устанавливающее связь между модулем напряжённости однородного электростатического поля и разностью потенциалов, т. е. между двумя характеристиками электростатического поля: $q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 E d$, откуда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = -\frac{\Delta\varphi_{12}}{d}.$$

Принимая во внимание, что $U_{12} = -\Delta\varphi_{12}$, получим

$$E = \frac{U_{12}}{d}. \quad (17.2)$$

На основании формулы (17.2) вводят единицу напряжённости СИ вольт на метр $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}}\right)$. 1 $\frac{\text{В}}{\text{м}}$ — модуль напряжённости такого однородного электростатического поля, в котором напряжение между двумя точками, находящимися на одной и той же линии напряжённости на расстоянии 1 м, составляет 1 В.

Используя термин «напряжение», на практике точки 1 и 2 поля выбирают так, чтобы $U_{12} > 0$.

- ✓ 1. Работа, совершаемая силами электростатического поля при перемещении пробного заряда из начальной точки 1 в конечную точку 2, равна произведению значения заряда и разности потенциалов (напряжения) между этими двумя точками поля:

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

2. Модуль напряжённости однородного электростатического поля и разность потенциалов (напряжение) при условии, что $U_{12} > 0$, связаны между собой соотношением

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U_{12}}{d}.$$

?

1. Что называют разностью потенциалов?
2. Как разность потенциалов между двумя точками поля зависит от работы сил электростатического поля?
3. В каких единицах измеряют разность потенциалов?
4. Как связано напряжение с напряжённостью однородного электростатического поля?

Примеры решения задач

Пример 1. В центре сферы с равномерно распределённым положительным зарядом $q_1 = 36$ нКл находится маленький шарик с отрицательным зарядом, модуль которого $|q_2| = 16$ нКл. Определите потенциал электростатического поля в точке, находящейся вне сферы на расстоянии $r = 10$ м от её центра.

Дано:

$$\begin{aligned} q_1 &= 36 \text{ нКл} = 3,6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \\ q_2 &= -16 \text{ нКл} = -1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \\ r &= 10 \text{ м} \end{aligned}$$

φ — ?

Решение. Потенциал в искомой точке определим по принципу суперпозиции: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$, где $\varphi_1 > 0$ — потенциал электростатического поля положительно заряженной сферы, а $\varphi_2 < 0$ — потенциал электростатического поля отрицательно заряженного шарика.

Поскольку $\varphi_1 = k \frac{q_1}{r}$, $\varphi_2 = k \frac{q_2}{r}$, то $\varphi = k \frac{q_1}{r} + k \frac{q_2}{r} = \frac{k}{r}(q_1 + q_2)$.

$$\varphi = \frac{9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}}{10 \text{ м}} \cdot 2,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} = 18 \text{ В}.$$

Ответ: $\varphi = 18$ В.

Пример 2. Электрон, движущийся вдоль линии напряжённости электростатического поля, в точке поля с потенциалом $\varphi_1 = 0,90$ В имеет скорость, модуль которой $v_1 = 3,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите потенциал точки поля, в которой электрон начинает двигаться в обратном направлении. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дано:

$$\varphi_1 = 0,90 \text{ В}$$

$$v_1 = 3,0 \cdot 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_2 = 0,0 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$\varphi_2 = ?$$

Решение. При движении электрона силы поля совершают работу $A = e(\varphi_1 - \varphi_2)$. Эта работа равна приращению (изменению) кинетической энергии электрона:

$\frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2)$. С учётом того, что скорость движения электрона уменьшилась до нуля, получим:

$$-\frac{m_e v_1^2}{2} = e(\varphi_1 - \varphi_2), \text{ откуда } \varphi_2 = \varphi_1 + \frac{m_e v_1^2}{2e} = \varphi_1 - \frac{m_e v_1^2}{2|e|}.$$

$$\varphi_2 = 0,90 \text{ В} - \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 9,0 \cdot 10^{10} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 0,64 \text{ В}.$$

Ответ: $\varphi_2 = 0,64$ В.

Упражнение 15

1. Силы электростатического поля совершают работу $A = 1,0$ мкДж, перемещая заряженную частицу из точки с потенциалом $\varphi_1 = 100$ В в точку с потенциалом $\varphi_2 = 75$ В. Определите значение электрического заряда частицы.

2. Напряжение между двумя точками, находящимися на одной линии напряжённости однородного электростатического поля на расстоянии $r_1 = 1,5$ см друг от друга, $U_{12} = 18$ В. Определите напряжение между двумя точками, расположенными на этой же линии напряжённости на расстоянии $r_2 = 20$ см друг от друга.

3. Чтобы в воздухе при атмосферном давлении проскочила искра, в нём должно быть электростатическое поле, модуль напряжённости которого не менее $E = 3,00 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$. Определите разность потенциалов между облаком и поверхностью Земли во время грозы, если длина «искры» — молнии — $d = 480$ м.

4. Напряжение между двумя точками, расположенными на одной линии напряжённости однородного электростатического поля, $U = 4,8$ кВ. Определите модуль напряжённости поля, если расстояние между точками $d = 12$ см.

5. Пылинка массой $m = 4,0 \cdot 10^{-9}$ кг находится во взвешенном состоянии между разноимённо заряженными горизонтальными пластинами. Напряжение между пластинами $U = 12$ В, расстояние между ними $d = 4,0$ см. Определите электрический заряд пылинки.

6. Электрон из состояния покоя ускоряется в электростатическом поле, двигаясь из точки 1 в точку 2, напряжение между которыми $U_{12} = 20$ В. Определите модуль скорости электрона в точке 2. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

7. В вершинах равнобедренного прямоугольного треугольника находятся точечные заряды $q_1 = 1,2$ нКл, $q_2 = 2,4$ нКл, $q_3 = 3,0$ нКл. Определите потенциал электростатического поля этих зарядов в точке, находящейся на середине гипотенузы длиной $a = 18$ см.

8*. Два маленьких шарика, электрические заряды которых $q_1 = 3,2$ нКл и $q_2 = 7,2$ нКл, находятся на расстоянии $r_1 = 40$ см друг от друга. Определите минимальное значение работы, которую надо совершить, чтобы сблизить шарики до расстояния $r_2 = 25$ см.

§ 18. Проводники в электростатическом поле

Мы уже обсуждали сходство и различие гравитационного и электростатического взаимодействий. Следует отметить ещё одно их существенное различие. От сил тяготения нельзя защититься. Нет такого убежища, в котором бы силы тяготения не действовали. А вот получить надёжную защиту от электростатических сил вполне возможно. Такую защиту может обеспечить любой проводник. Так какие же свойства проводников позволяют использовать их для электростатической защиты?

Проводники в электростатическом поле. В металлах свободными заряженными частицами являются электроны. Это происходит потому, что электроны, находящиеся на внешних оболочках атомов, утрачивают связи со своими атомами и могут относительно свободно передвигаться по всему объёму металла.

Выясним, что происходит в однородном металлическом проводнике, если его внести в электростатическое поле. Для этого поместим металлический проводник A в электростатическое поле, созданное двумя заряженными пласти-

нами B и C (рис. 99). Напряжённость $\vec{E}_0$ этого поля направлена от положительно заряженной пластины B к отрицательно заряженной пластине C . Под действием электрических сил свободные электроны наряду с непрерывающимся тепловым движением начнут двигаться упорядоченно. Они будут накапливаться слева у поверхности проводника A , создавая там избыточный отрицательный заряд. Недостаток электронов на правой стороне проводника приведёт к возникновению на ней избыточного положительного заряда.

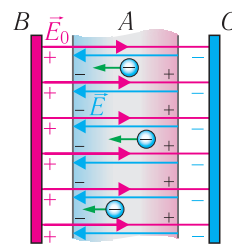


Рис. 99

Перераспределившиеся заряды создают собственное электрическое поле $\vec{E}$. Линии напряжённости этого поля в проводнике направлены в сторону, противоположную линиям напряжённости внешнего поля $\vec{E}_0$. Упорядоченное перемещение свободных электронов в проводнике прекратится, если собственное поле $\vec{E}$ скомпенсирует внешнее $\vec{E}_0$. В этом случае напряжённость результирующего поля внутри проводника станет равной нулю, т. е. электрическое поле в проводнике исчезнет.

Следовательно, *электростатическое поле внутри проводника отсутствует*. Суммарный заряд любой внутренней области проводника равен нулю и не влияет на распределение зарядов на его поверхности и на напряжённость поля внутри проводника. На этом свойстве проводников основана *электростатическая защита*. Чтобы защитить чувствительные к электрическому полю приборы, их помещают внутрь заземлённых полых проводников со сплошными или сетчатыми стенками. Чаще, однако, экранируют не приборы, а сам источник электрического поля, от нежелательного воздействия которого необходимо защитить расположенные поблизости устройства.

Следствием того, что напряжённость электростатического поля внутри однородного проводника равна нулю, является то, что потенциал всех точек проводника одинаков. В самом деле, если напряжённость поля равна нулю, то разность потенциалов между любыми двумя точками проводника равна нулю. Поэтому можно говорить о потенциале проводника, не указывая конкретную точку, в которой он определён.

Электростатическая индукция. В соответствии с законом сохранения электрического заряда модули избыточных зарядов, возникающих на противоположных поверхностях первоначально незаряженного проводника при внесении его в электростатическое поле, должны быть равными. Проверим это на опыте.

Закрепим на непроводящих стержнях два плотно соприкасающихся металлических цилиндра A и B с прикреплёнными к ним листочками тонкой бумаги. Внесём их в электростатическое поле положительно заряженного шара (рис. 100, a). Листочки бумаги разойдутся, что свидетельствует о появлении зарядов на цилиндрах. Свободные электроны под действием поля, создаваемого зарядом шара, переместятся с цилиндра B на цилиндр A , зарядив его отрицательно. Цилиндр B из-за недостатка электронов станет положительно заряженным.

Явление, при котором на поверхности проводника (в данном случае на поверхности соединённых цилиндров), помещённого в электростатическое поле, появляются электрические заряды, называют *электростатической индукцией* или *электризацией через влияние*. Электрические заряды, возникающие в результате электростатической индукции, называют *индуцированными*.

Если заряженный шар убрать, то угол расхождения листочков бумаги уменьшится до нуля. Это объясняется тем, что в отсутствие электростатического поля, создаваемого зарядом шара, электроны равномерно распределяются по всему объёму обоих цилиндров.

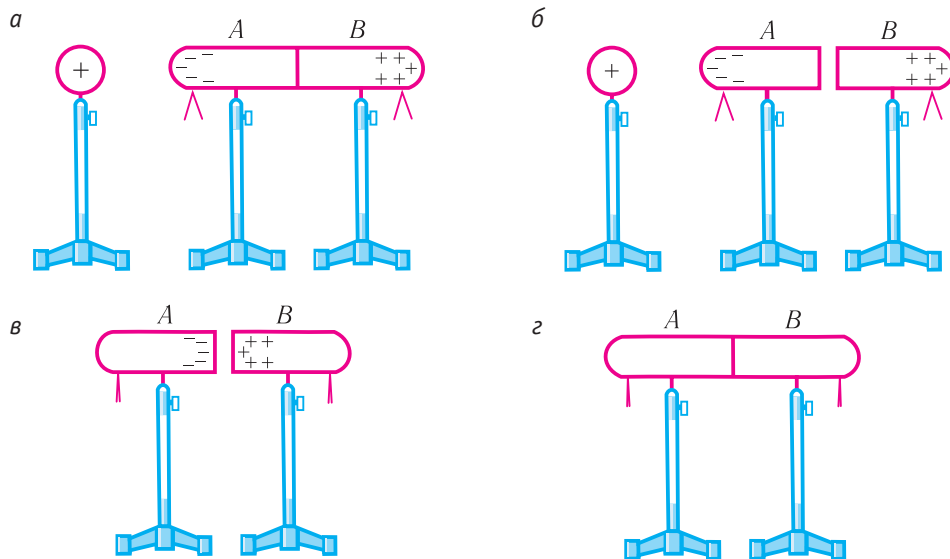


Рис. 100

При разъединении цилиндров в поле заряженного шара на них окажутся противоположные по знаку заряды (рис. 100, б), модули которых равны. Эти заряды сохранятся и в том случае, если заряженный шар, создающий поле, убрать (рис. 100, в). Только в этом случае заряды будут у соседних оснований цилиндров. В том, что модули зарядов обоих цилиндров равны, можно убедиться, соединив их (рис. 100, г): угол между листочками равен нулю.

Распределение зарядов в проводнике. Выясним, как распределяются заряды в наэлектризованном проводнике. Проведём опыт. Сообщим проводнику электрический заряд. Маленьким шариком на изолирующей ручке будем касаться различных точек на внешней поверхности заряженного поло-го металлического шара, а затем электрометра (рис. 101, а). Отмечая каждый раз угол отклонения стрелки электрометра, можно убедиться, что на внешней поверхности шара заряд распределяется равномерно. Если же коснуться маленьким шариком внутренней поверхности заряженного поло-го шара, а затем электрометра, то стрелка электрометра не отклонится (рис. 101, б). Следовательно, на внутренней поверхности шара избыточно-го заряда нет, т. е. заряды, сообщённые проводнику, располагаются на его внешней поверхности.

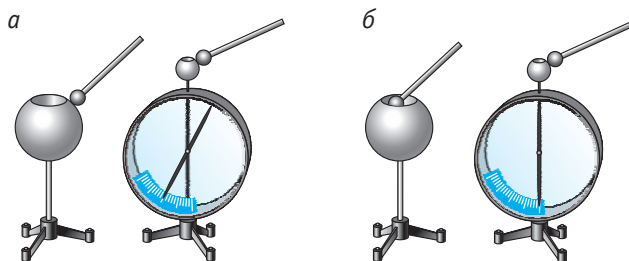


Рис. 101



Зарядим проводник стреловидной формы положительным зарядом. Наибольший заряд, приходящийся на небольшие одинаковой площади участки поверхности, находится на выпуклостях проводника, особенно на остриях. На рисунке 102 штриховой линией для наглядности показано распределение модуля напряжённости поля у поверхности заряженного проводника стреловидной формы. Напряжённость электростатического поля вблизи острых выступов заряженного проводника может оказаться настолько большой, что начнётся ионизация молекул газов, входящих в

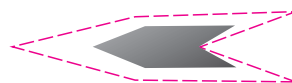


Рис. 102

состав воздуха, в результате которой появятся положительные и отрицательные ионы и электроны. Заряженные частицы с тем же знаком заряда, что и на острие, движутся от него, увлекая нейтральные молекулы. Вследствие этого возникает направленное движение воздуха у острия, или, как говорят, «электрический ветер». Его можно обнаружить, если поднести к острию зажжённую свечу: её пламя отклонится в сторону от острия и может быть даже погашено.

Явление стекания зарядов с заострённых проводников приходится учитывать в технике. Для предотвращения стекания зарядов у всех приборов и механизмов, используемых в высоковольтных системах, металлические части делают закруглёнными, а концы металлических стержней снабжают гладкими наконечниками.



1. Проводник — одна из моделей, используемых в электростатике, описывающая однородное тело, внутри которого напряжённость электростатического поля везде равна нулю.

2. Явление, при котором на поверхности проводника, помещённого в электростатическое поле, появляются электрические заряды, называют электростатической индукцией или электризацией через влияние.

3. Потенциалы всех точек на поверхности и внутри однородного проводника, помещённого в электростатическое поле, одинаковы.

4. Заряды, сообщённые проводнику, располагаются на его внешней поверхности.



1. Что происходит в однородном металлическом проводнике при внесении его в электростатическое поле?

2. На каком свойстве проводников основана электростатическая защита?

3. В чём состоит явление электростатической индукции?

4. Объясните опыты с двумя металлическими цилиндрами, помещёнными в электростатическое поле (см. рис. 100).

5. Чему равна сила, действующая на точечный заряд, если его поместить в центр равномерно заряженной сферы? в любую другую точку внутри этой сферы?

§ 19. Диэлектрики в электростатическом поле

Исследуя явление электризации через влияние, английский физик Стефан Грей (1670—1736) установил в 1729 г., что вещества можно разделить на два класса: способные переносить электрические заряды и этим свойством не обладающие. Соответствующие термины «про-

водник» и «изолятор» были введены в 1742 г. англичанином Жаном Теофилом Дегазюлье (1683—1744). Примерами хороших диэлектриков являются янтарь, стекло, эбонит, резина, шёлк, пластмасса, слюда, фарфор. Что происходит в диэлектрике, помещённом в электростатическое поле?

Диэлектрики. Термин «диэлектрик» ввёл Фарадей в 1838 г. для обозначения вещества, в которое проникает электростатическое поле («диэлектрик» от греч. *dia* — через, сквозь и англ. *electric* — электрический). В диэлектрике все электроны связаны с ядрами атомов. Электрическое поле не «отрывает» их от атомов, а лишь слегка смещает по отношению к положительно заряженным ядрам. Диэлектрик содержит только *связанные заряды*, т. е. заряды, входящие в состав атомов (молекул) диэлектрика и лишённые возможности свободно перемещаться под действием электрического поля.

Вясним, что происходит в диэлектрике, помещённом в электростатическое поле.

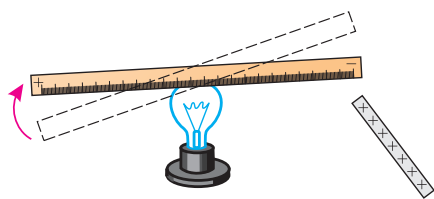


Рис. 103

Проведём опыт. Длинную деревянную линейку установим на подставке так, чтобы она могла свободно вращаться (рис. 103). Наэлектризуем стеклянную (или эбонитовую) палочку и поднесём её к одному из концов линейки. Линейка начнёт поворачиваться. Следовательно, незаряженный диэлектрик, каким является деревянная линейка, притягивается к заряженному телу.

Подобное поведение диэлектрика возможно только при условии появления на его концах избыточных зарядов, противоположных по знаку.

Поляризация диэлектрика. Каков же механизм перераспределения зарядов по поверхности диэлектрика? Действие электростатического поля с напряжённостью $\vec{E}$, в которое помещён диэлектрик, сводится к перераспределению электронов в объёме каждого атома диэлектрика. В результате центр электрического заряда электронной оболочки атома смещается относительно центра положительно заряженного ядра атома. В целом нейтральная молекула превращается в электрический диполь (*ди* — два, *поль* — полюс) (рис. 104). Рассмотренное явление получило название *электронной поляризации*. Механизм электронной

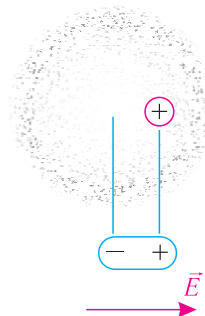


Рис. 104

поляризации универсален, поскольку проявляется в атомах, молекулах или ионах любого диэлектрика.

Если диэлектрики состоят из молекул, являющихся электрическими диполями в отсутствие внешнего поля, то их называют полярными (вода, аммиак, эфир, ацетон и др.). У полярных диэлектриков в отсутствие внешнего электростатического поля молекулы-диполи, совершая тепловое движение, располагаются хаотически (рис. 105, а). Результирующее электрическое поле, создаваемое молекулами-диполями, практически равно нулю.

Под действием внешнего электростатического поля молекулы-диполи стремятся повернуться так, чтобы их оси совпали с направлением напряжённости внешнего поля (рис. 105, б). Если направление напряжённости поля перпендикулярно поверхностям, ограничивающим диэлектрик, то одна из этих поверхностей оказывается заряженной отрицательно, а другая — положительно.

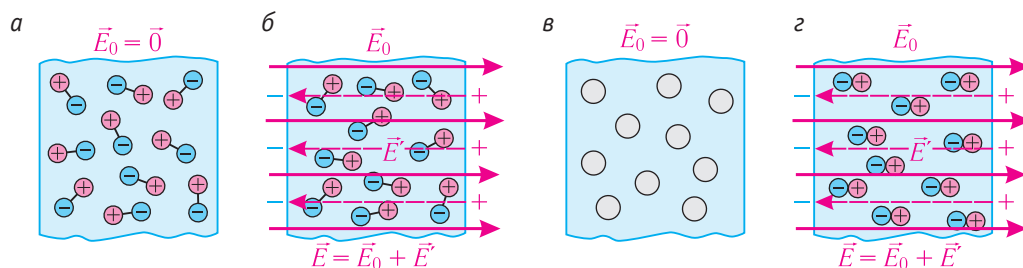


Рис. 105

У неполярных диэлектриков (парафин, бензол, азот и др.) молекулы со сферически симметричным распределением зарядов в отсутствие внешнего электрического поля не создают и собственного поля (рис. 105, в). Под влиянием электростатического поля, как уже было сказано, положительные и отрицательные заряды в пределах молекулы несколько смещаются один относительно другого, образуя диполь. Поэтому, как и в случае с полярными диэлектриками, в неполярных диэлектриках на одной поверхности появляется положительный поляризационный заряд, на другой — отрицательный (рис. 105, г).

В отличие от свободных зарядов проводника поляризационные заряды в диэлектрике не перемещаются, поэтому их и называют связанными. Эти заряды нельзя отделить один от другого. Так, если поляризованный диэлектрик разрезать пополам во внешнем электрическом поле, то на одной стороне каж-

дой половинки будет нескомпенсированный положительный заряд, а на другой — отрицательный.

Электрическое поле внутри диэлектрика. Поляризационные заряды (см. рис. 105, б, г) создают собственное электростатическое поле, напряжённость $\vec{E}'$ которого направлена навстречу напряжённости $\vec{E}_0$ внешнего поля и ослабляет её, но не компенсирует полностью.

Согласно принципу суперпозиции модуль напряжённости E результирующего электростатического поля внутри диэлектрика $E = E_0 - E' < E_0$.

Для характеристики электрических свойств диэлектриков вводят физическую величину, называемую диэлектрической проницаемостью вещества.

Диэлектрическая проницаемость вещества ϵ — физическая скалярная величина, показывающая, во сколько раз модуль напряжённости $|\vec{E}|$ электростатического поля внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряжённости $|\vec{E}_0|$ поля в вакууме:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Если точечные неподвижные заряды q_1 и q_2 находятся в однородном безграничном диэлектрике, то модуль сил их электростатического взаимодействия определяют по формуле:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Различные диэлектрики поляризуются внешним полем по-разному и имеют разную диэлектрическую проницаемость. Так, диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 25 °С равна 78,54, льда при температуре –10 °С — 95, а стекла — от 4 до 16 в зависимости от его сорта. Диэлектрическую проницаемость воздуха, равную 1,0006, при решении задач округляют до 1.

!

Поляризацию частиц в сильном электростатическом поле используют в электрических фильтрах для очистки дыма от твёрдых продуктов сгорания топлива, загрязняющих территорию вокруг тепловых электростанций и крупных предприятий (рис. 106). Для этого в дымоходах устанавливают проводники специальной формы, которым сообщают определённый электрический заряд.



Рис. 106

Электрофильтры устанавливают на химических заводах, в цехах, производящих цемент, и других аналогичных производствах. Поляризованные частицы всевозможной пыли притягиваются к вертикальным электродам (рис. 107). Когда модуль силы тяжести, действующей на частицы, задерживаемые фильтром, достигает определённого значения, пыль оседает на дно фильтра. Для очистки фильтра пыль из него периодически удаляют.

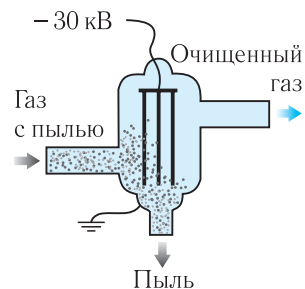


Рис. 107



1. Диэлектрик — одна из моделей, используемых в электростатике, описывающая такое вещество, что внутри тел, состоящих из этого вещества, напряжённость электростатического поля может быть отлична от нуля.

2. Явление перераспределения электрических зарядов в диэлектрике при внесении его в электростатическое поле называют поляризацией.

3. Диэлектрическая проницаемость вещества — физическая скалярная величина, показывающая, во сколько раз модуль напряжённости электростатического поля внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряжённости поля в вакууме:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}.$$



1. Какие заряды называют связанными?
2. На какие два типа делят диэлектрики в зависимости от пространственного распределения зарядов в их молекулах?
3. Что называют поляризацией диэлектрика?
4. Каков механизм поляризации полярных и неполярных диэлектриков?
5. Существует ли поле внутри диэлектрика, находящегося во внешнем электростатическом поле?
6. Что называют диэлектрической проницаемостью вещества?

§ 20. Электроёмкость. Конденсаторы.

Электроёмкость плоского конденсатора

Проводники и системы, состоящие из нескольких проводников, обладают свойством накапливать электрический заряд. Во многих электротехнических и радиотехнических приборах используют устройства, способные при малых размерах накапливать достаточно большой по абсолютной величине электрический заряд. Выясним, как это можно осуществить.

Электрическая ёмкость. Для характеристики свойства проводника накапливать электрический заряд ввели физическую величину — электрическую ёмкость. Для объяснения физического смысла этой величины рассмотрим следующий опыт: присоединим тонким длинным проводником к стержню электрометра с заземлённым корпусом уединённый полый металлический шар.

Проводник считают уединённым, если он расположен вдали от возможных источников электрического поля как проводящих, так и непроводящих тел. Если вблизи заряженного проводника находятся другие тела, то вследствие явления электростатической индукции в проводниках происходит перераспределение свободных электрических зарядов, а в диэлектриках — смещение в противоположные стороны разноимённых зарядов, входящих в состав атомов и молекул вещества, приводящее к возникновению поляризационных зарядов. Поляризационные заряды, возникающие в диэлектриках, и заряды, индуцируемые на проводниках, создают дополнительное электростатическое поле, изменяющее потенциал заряженного проводника.

Касаясь наэлектризованным проводящим шариком, закреплённым на изолирующей ручке, внутренней поверхности полого металлического шара, будем последовательно сообщать ему одинаковые положительные электрические заряды, увеличивая его суммарный заряд в 2, 3 и т. д. раз (рис. 108). Чем больше сообщённый шару электрический заряд, тем больше его потенциал, так

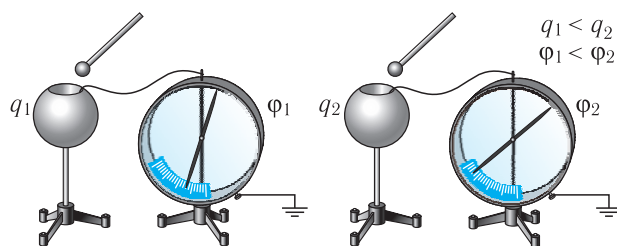


Рис. 108

как $\varphi = k \frac{q}{R}$, где R — радиус шара. Значит, во сколько раз увеличился заряд шара, соответственно во столько же раз увеличился и его потенциал, т. е. отношение электрического заряда к потенциалу остаётся величиной постоянной для данного шара: $\frac{q_1}{\varphi_1} = \frac{q_2}{\varphi_2} = \frac{q_3}{\varphi_3} = \dots = \frac{q_n}{\varphi_n} = \text{const.}$

Прямая пропорциональная зависимость между потенциалом и электрическим зарядом справедлива не только для шарообразных проводников, но и для любого уединённого проводника произвольной формы. Необходимо только, чтобы форма и размеры проводника, а также диэлектрические свойства среды, в которой он находится, оставались неизменными.

Электрическая ёмкость C уединённого проводника — физическая скалярная величина, количественно характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и равная отношению заряда q проводника к его потенциалу φ :

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

Обращаем ваше внимание, что электрическая ёмкость является характеристикой проводника и не зависит ни от его заряда, ни от потенциала. Поскольку заряды располагаются только на внешней поверхности проводника, то ни от вещества, из которого он изготовлен, ни от его массы электроёмкость проводника также не зависит. Она зависит только от формы и размеров проводника, а также от диэлектрической проницаемости среды, в которой этот проводник находится.

Единицу электрической ёмкости в СИ называют фарад (Φ).

1 Φ — электроёмкость такого уединённого проводника, которому для повышения потенциала на 1 В необходимо сообщить заряд 1 Кл:

$$1 \Phi = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

1 Φ — очень большая электроёмкость. Например, в вакууме электроёмкостью $C = 1 \Phi$ обладал бы уединённый шар радиусом $R = 9 \cdot 10^9$ м (для сравнения: радиус земного шара $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$ м). Поэтому на практике применяют дольные единицы: микрофарад ($1 \text{ мк}\Phi = 1 \cdot 10^{-6} \Phi$), нанофарад ($1 \text{ н}\Phi = 1 \cdot 10^{-9} \Phi$) и пикофарад ($1 \text{ п}\Phi = 1 \cdot 10^{-12} \Phi$).

Например, электроёмкость такого огромного проводника, как земной шар, $C = 0,71$ мФ, а электроёмкость человеческого тела примерно $C = 50$ пФ.

! Електроёмкость уединённого проводящего шара радиусом R , находящегося в безграничной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , определяют по формуле $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R$. Это выражение можно получить в результате математических преобразований двух формул: для нахождения електроёмкости $C = \frac{q}{\varphi}$ и потенциала заряженного шара $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon R}$.

Конденсаторы. Для получения нужных значений електроёмкости используют *конденсатор* — систему, состоящую из двух или более проводников и способную накапливать и отдавать (перераспределять) электрические заряды. Конденсатор — от лат. *condensare* — уплотнять, сгущать.

Чтобы на електроёмкость конденсатора не оказывали влияние окружающие тела, проводникам, образующим конденсатор, придают такую форму, при которой поле, создаваемое зарядами этих проводников, сосредоточено между ними. Этому условию удовлетворяют две близко расположенные пластины (плоский конденсатор) (рис. 109, а), два коаксиальных цилиндра (цилиндрический конденсатор) (рис. 109, б), две концентрические сферы (сферический конденсатор) (рис. 109, в).

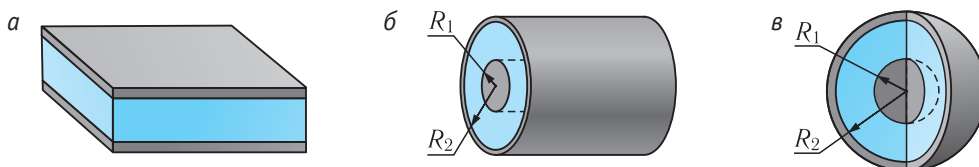


Рис. 109

! Широко распространённый тип конденсаторов представляет собой две ленты металлической фольги, разделённые тонкой парафинированной бумагой, полистиролом, слюдой или другим диэлектриком, которые свёрнуты в тугую спираль и запаяны (рис. 110).

Используют и так называемые воздушные конденсаторы, в которых изолирующим слоем, отделяющим проводники, является воздух.

Простейший конденсатор — система, состоящая из двух проводников, разделённых слоем

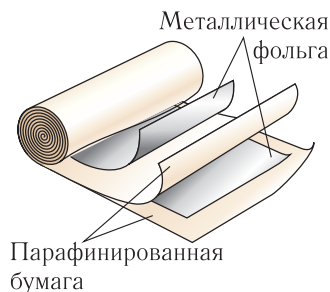


Рис. 110

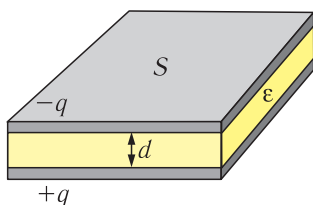


Рис. 111

диэлектрика, толщина d которого мала по сравнению с размерами проводников (рис. 111). Проводники, образующие конденсатор, называют его обкладками. На обкладках конденсатора накапливаются противоположные по знаку электрические заряды, модули которых равны. Процесс накопления зарядов на обкладках называют зарядкой конденсатора. Процесс нейтрализации зарядов при соединении обкладок конденсатора проводником на-

зывают разрядкой конденсатора. Модуль заряда, находящегося на одной из обкладок конденсатора, называют зарядом конденсатора.

Свойство конденсатора накапливать и сохранять в течение длительного промежутка времени электрические заряды характеризуют его электрической ёмкостью.

Электрической ёмкостью C конденсатора называют физическую скалярную величину, количественно характеризующую способность конденсатора накапливать электрические заряды и равную отношению заряда q конденсатора к напряжению U между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Электроёмкость плоского конденсатора. Если обкладками конденсатора являются две одинаковые параллельные друг другу пластины, то конденсатор называют *плоским*. Электростатическое поле заряженного плоского конденсатора в основном сосредоточено между его обкладками и является практически однородным (рис. 112, а). Вблизи краёв пластин однородность поля нарушается, однако этим часто пренебрегают, когда расстояние между пластинами значительно меньше их размеров (рис. 112, б).

Чтобы установить, от чего зависит электроёмкость плоского конденсатора, проведём несколько опытов. В качестве обкладок конденсатора используем две металлические пластины, расположенные в воздухе на некотором расстоянии

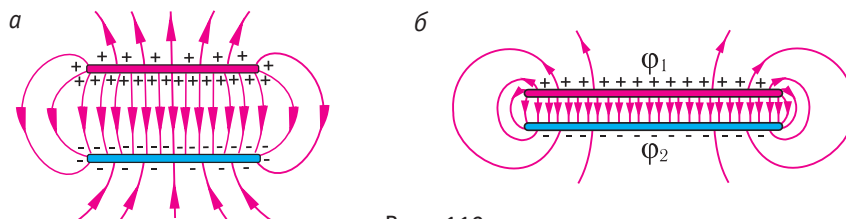


Рис. 112

параллельно друг другу. Соединим стержень электрометра с одной из пластин, а его корпус с другой (рис. 113). Зарядим конденсатор, подключив его к батарее элементов (источнику тока) на некоторый промежуток времени. Когда между пластинами конденсатора возникнет напряжение (стрелка электрометра отклонится), отключим его от источника тока.

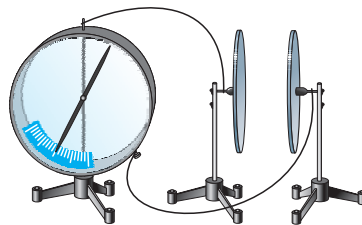


Рис. 113

Если перемещать пластины относительно друг друга, уменьшая площадь их взаимного перекрытия при неизменном расстоянии между ними, то показания электрометра при этом увеличиваются, хотя сообщённый пластинам при зарядке конденсатора заряд не изменяется. Так как напряжение между пластинами увеличивается при уменьшении площади перекрытия пластин конденсатора, то его электроёмкость должна уменьшаться ($S \downarrow \Rightarrow C \downarrow$).

Увеличивая расстояние между пластинами конденсатора, не меняя площади их перекрытия, будем наблюдать возрастание показаний электрометра, т. е. увеличение напряжения между пластинами конденсатора, что возможно при уменьшении его электроёмкости. Значит, чем больше расстояние между пластинами конденсатора, тем меньше его электроёмкость ($d \uparrow \Rightarrow C \downarrow$).

Если между обкладками конденсатора поместить пластину из диэлектрика, например, из стекла, то показания электрометра уменьшатся. Напряжение между обкладками в этом случае уменьшается, следовательно, электроёмкость конденсатора увеличивается ($\epsilon \uparrow \Rightarrow C \uparrow$).

В СИ коэффициентом пропорциональности между электроёмкостью конденсатора и определяющими её величинами (S , d , ϵ) является электрическая

постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$.

Результаты экспериментов позволяют записать формулу для определения электроёмкости плоского конденсатора:

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

где S — площадь одной из обкладок конденсатора, d — расстояние между обкладками, ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, находящейся между его обкладками.

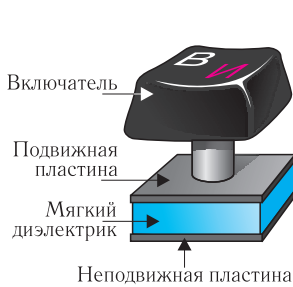


Рис. 114



Рис. 115

! Зависимость электроёмкости конденсатора от расстояния между его пластинами используют в схемах кодирования клавиатуры персонального компьютера. Под каждой клавишей находится конденсатор, электроёмкость которого изменяется при нажатии на клавишу. Микросхема, подключённая к каждой клавише, при изменении электроёмкости выдаёт кодированный сигнал, соответствующий данной букве (рис. 114).

Условное изображение конденсатора постоянной электроёмкости на электрических схемах представлено на рисунке 115.

! На схемах номинальную электроёмкость конденсаторов обычно указывают в микрофарадах и пикофарадах. Однако реальная электроёмкость конденсатора может значительно меняться в зависимости от многих

факторов. Другой, не менее важной характеристикой конденсаторов является номинальное напряжение — значение напряжения, обозначенное на конденсаторе, при котором его можно использовать в заданных условиях в течение срока службы. Это напряжение может находиться в пределах от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт. Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. Для многих типов конденсаторов с увеличением температуры допустимое напряжение уменьшается.

Для получения нужной электроёмкости конденсаторы соединяют в батареи, используя их параллельное и последовательное соединение. При параллельном соединении (рис. 116) положительно заряженные обкладки конденсаторов соединяют в одну группу, а отрицательно заряженные — в другую. При таком соединении напряжение на всех конденсаторах одинаковое, но их заряды могут быть разными.

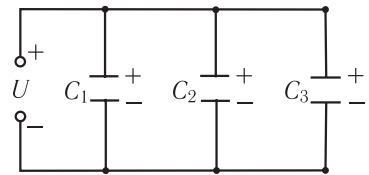


Рис. 116

! При *параллельном соединении* конденсаторов:

1) напряжение на полюсах батареи конденсаторов равно напряжению на каждом конденсаторе:

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n;$$

2) полный заряд батареи конденсаторов равен сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n;$$

3) электроёмкость батареи конденсаторов равна сумме электроёмкостей отдельных конденсаторов:

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

Параллельное соединение конденсаторов применяют для получения большой электроёмкости.

При последовательном соединении (рис. 117) положительно заряженная обкладка предыдущего конденсатора соединена с отрицательно заряженной обкладкой последующего. При таком соединении модули зарядов на всех обкладках равны, а суммарный заряд соединённых друг с другом обкладок равен нулю.

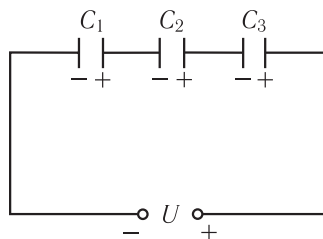


Рис. 117



При *последовательном соединении* конденсаторов:

1) напряжение на полюсах батареи конденсаторов равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n;$$

2) заряд батареи конденсаторов равен заряду каждого конденсатора:

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n;$$

3) величина, обратная электроёмкости батареи, равна сумме величин, обратных электроёмкостям отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$



1. Электрическая ёмкость уединённого проводника — физическая скалярная величина, количественно характеризующая способность проводника накапливать электрический заряд и равная отношению заряда проводника к его потенциалу:

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

2. Электроёмкость проводника зависит только от его формы и размеров, а также от диэлектрической проницаемости среды, в которой этот проводник находится.

3. Электрической ёмкостью конденсатора называют физическую скалярную величину, количественно характеризующую способность

конденсатора накапливать электрические заряды и равную отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}.$$

4. Электроёмкость плоского конденсатора зависит от площади обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости среды, находящейся между обкладками:

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

?

1. Какой проводник можно считать уединённым?
2. Что называют электрической ёмкостью уединённого проводника?
3. От чего зависит и от чего не зависит электроёмкость проводника?
4. Обладает ли электроёмкостью незаряженный проводник?
5. Какую систему проводников называют конденсатором?
6. Что представляет собой плоский конденсатор? Каково его назначение?
7. Какой процесс называют зарядкой конденсатора? разрядкой конденсатора?
8. От чего зависит электроёмкость плоского конденсатора?
9. Плоский воздушный конденсатор присоединён к источнику постоянного тока. Изменится ли заряд конденсатора и напряжение на нём, если пространство между обкладками конденсатора заполнить диэлектриком?

Примеры решения задач

Пример 1. Плоскому конденсатору электроёмкостью $C = 0,4$ мкФ сообщён электрический заряд $q = 2$ нКл. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками конденсатора, если расстояние между ними $d = 5$ мм.

Дано:

$$\begin{aligned} C &= 0,4 \text{ мкФ} = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \\ q &= 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ d &= 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

E — ?

Решение. Модуль напряжённости однородного электростатического поля определим по формуле $E = \frac{U}{d}$. Так как напряжение между обкладками

конденсатора $U = \frac{q}{C}$, то $E = \frac{q}{Cd}$.

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 10^{-7} \text{ Ф} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Ответ: $E = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Пример 2. Пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено диэлектриком. Конденсатор зарядили до напряжения $U_1 = 1$ кВ и отключили от источника тока. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если после его удаления из конденсатора напряжение увеличилось до $U_2 = 3$ кВ.

Дано:

$$U_1 = 1 \text{ кВ} = 1 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$U_2 = 3 \text{ кВ} = 3 \cdot 10^3 \text{ В}$$

$$\epsilon_2 = 1$$

$$\epsilon_1 = ?$$

Решение. В обоих случаях заряд конденсатора будет одинаковым $q_1 = q_2$, так как он отключён от источника тока. Поскольку $q_1 = C_1 U_1$, $q_2 = C_2 U_2$, то $C_1 U_1 = C_2 U_2$ (1). Электроёмкость плоского конденсатора определяют по

формуле $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$. Для рассматриваемых случаев электроёмкости соответственно равны: $C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}$, $C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{d}$ (2). Подставив фор-

мулы (2) в равенство (1), получим: $\epsilon_1 U_1 = \epsilon_2 U_2$, $\epsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \epsilon_2$, $\epsilon_1 = \frac{3 \cdot 10^3 \text{ В}}{1 \cdot 10^3 \text{ В}} \cdot 1 = 3$.

Ответ: $\epsilon_1 = 3$.

Упражнение 16

1. Определите электроёмкость конденсатора, если напряжение между его обкладками $U = 20$ В, а его заряд $q = 5,0 \cdot 10^{-4}$ Кл.

2. Электроёмкость плоского воздушного конденсатора $C = 54$ пФ. Определите расстояние между его обкладками, если площадь каждой из них $S = 300$ см².

3. Определите, как изменится электроёмкость плоского конденсатора, если площадь каждой из его обкладок увеличить в два раза, а расстояние между ними уменьшить в три раза.

4. Обкладки плоского конденсатора площадью $S = 100$ см² каждая расположены на расстоянии $d = 2,0$ мм друг от друга. Пространство между обкладками заполнено слюдой, диэлектрическая проницаемость которой $\epsilon = 6,0$. Определите заряд конденсатора, если напряжение между его обкладками $U = 3,0$ кВ.

5. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками плоского воздушного конденсатора, если сообщённый ему заряд $q = 20$ нКл, а площадь каждой из обкладок $S = 50$ см².

6. Модуль напряжённости электростатического поля в пространстве между обкладками плоского конденсатора $E_1 = 2,1 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Не отключая конденсатор от источника тока, расстояние между его обкладками уменьшили в четыре раза. Определите модуль напряжённости поля после сближения обкладок.

7. Капля массой $m = 1,5$ г находится в равновесии между обкладками горизонтально расположенного плоского конденсатора, заряженного до напряжения $U = 500$ В. Определите расстояние между обкладками, если заряд капли $q = 0,15$ мкКл.

8*. Обкладки плоского конденсатора площадью $S = 200$ см² каждая расположены на расстоянии $d = 4,0$ мм друг от друга. Пространство между ними заполнено керосином, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 2,0$. Определите модуль сил притяжения зарядов обкладок, если напряжение на конденсаторе $U = 2,0$ кВ.

§ 21. Энергия электростатического поля конденсатора

В процессе электризации тел внешние силы совершают работу по перераспределению зарядов между телами, преодолевая силы кулоновского притяжения при разделении отрицательных и положительных зарядов. Но всякое разделение зарядов приводит к возникновению электростатического поля. Это означает, что для создания электростатического поля системы заряженных тел необходимо совершить работу по перемещению зарядов между этими телами. Если в качестве таких тел рассматривать обкладки конденсатора, то процесс его зарядки можно представить как перенос заряда q с одной обкладки на другую, в результате чего одна из них приобретает заряд $-q$, а другая — $+q$. Работа, совершённая при этом внешними силами, равна энергии электростатического поля заряженного конденсатора.

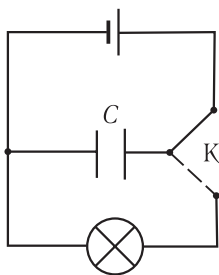


Рис. 118

Убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно на опыте. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, конденсатора и электрической лампы (рис. 118). Зарядим конденсатор, подсоединив его к источнику тока. Затем, отключив конденсатор от источника тока, подсоединим его к лампе. При этом наблюдаем кратковременную вспышку света. В данном случае во время разрядки конденсатора его энергия превращается во внутреннюю энергию спирали лампы, часть этой энергии расходуется на излучение света.

При прохождении электрического тока по цепи конденсатор заряжался, т. е. на его обкладках накапливались электрические заряды. При этом в окру-

жающем конденсатор пространстве возникло электростатическое поле. Суммарный электрический заряд обеих обкладок конденсатора до зарядки, во время зарядки и после разрядки равен нулю. Единственное изменение, которое произошло при разрядке конденсатора, заключается в том, что исчезло электростатическое поле, которое создавалось зарядами на обкладках конденсатора. Следовательно, энергией обладало электростатическое поле, образованное зарядами на обкладках заряженного конденсатора.

Если форма и размеры обкладок конденсатора, а также расстояние между ними и диэлектрические свойства среды, заполняющей пространство между обкладками, остаются неизменными, то напряжение на конденсаторе прямо пропорционально модулю

заряда его обкладок $U = \frac{1}{C}q$ (рис. 119). Чтобы

увеличить модуль заряда на обкладках от q_i до $q_i + \delta q$, внешней силе необходимо совершить работу $\delta A_i = U_i \cdot \delta q$ по перемещению бесконечно малой положительной порции заряда δq с отрицательной обкладки на положительную. Этой работе на рисунке 119 соответствует площадь заштрихованного столбика. Полная же работа A по зарядке конденсатора до напряжения U равна сумме площадей всех аналогичных столбиков, т. е. площади фигуры под графиком зависимости $U(q)$. В данном случае — площади треугольника, равной половине произведения его основания на высоту:

$$A = \frac{qU}{2}.$$

Приращение энергии электростатического поля заряженного конденсатора равно работе, совершённой внешней силой при его зарядке:

$$\Delta W = W - 0 = A = \frac{qU}{2}.$$

Учитывая, что $q = CU$, формулу для определения энергии электростатического поля заряженного конденсатора можно записать в виде

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad \text{или} \quad W = \frac{q^2}{2C}.$$

Энергию электростатического поля заряженного конденсатора можно выразить через напряжённость $\vec{E}$ поля, сосредоточенного между его обкладками (рис. 120).

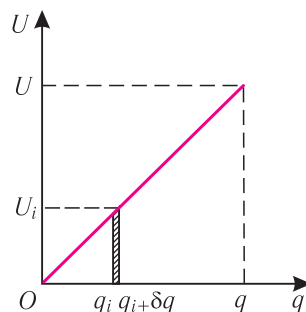


Рис. 119

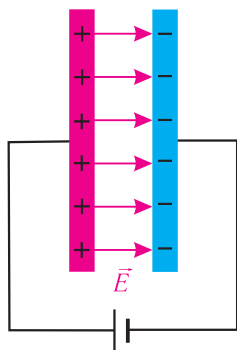


Рис. 120

Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$,
 напряжение между обкладками $U = Ed$. Следовательно,

$$W = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} S d = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} V,$$
 где $V = Sd$ — объём пространства между обкладками конденсатора.

Применение конденсаторов. Конденсаторы находят широкое применение в электротехнике, радиотехнической и телевизионной аппаратуре, радиолокационной технике, телефонии, технике счётно-решающих устройств, лазерной технике, электроэнергетике (например, для улучшения коэффициента мощности промышленных установок, регулирования напряжения в распределительных сетях, в устройствах освещения люминесцентными лампами), металлопромышленности (например, для плавки и термической обработки металлов), добывающей промышленности (например, в электровзрывных устройствах), медицинской технике (например, в рентгеновской аппаратуре, приборах электролечения), фототехнике (для получения вспышки света при фотографировании).

В связи с этим наряду с миниатюрными конденсаторами, имеющими массу менее грамма и размеры порядка нескольких миллиметров, существуют конденсаторы с массой в несколько тонн (рис. 121).

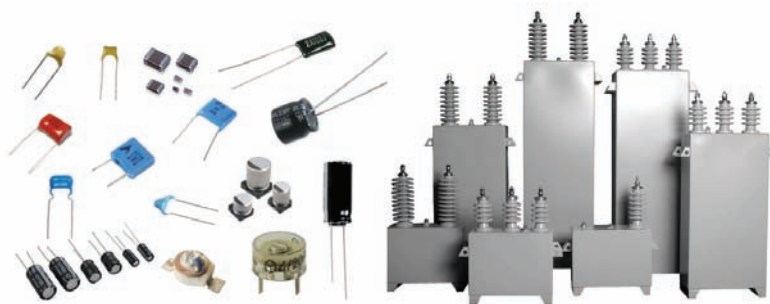


Рис. 121



Энергию электростатического поля любого конденсатора можно опре-

делить по формулам $W = \frac{qU}{2}$, $W = \frac{CU^2}{2}$, $W = \frac{q^2}{2C}$.



1. Какие факты позволяют сделать вывод, что электростатическое поле обладает энергией?
2. Объясните, как, используя график зависимости напряжения между обкладками конденсатора от модуля заряда на них, можно вычислить работу при зарядке конденсатора.
3. По какой формуле можно рассчитать энергию электростатического поля заряженного конденсатора?
4. Как изменится энергия электростатического поля заряженного конденсатора при увеличении расстояния между его обкладками, если: а) конденсатор отключён от источника тока; б) конденсатор подключён к источнику тока?

Пример решения задачи

Плоский воздушный конденсатор, состоящий из двух обкладок площадью $S = 100 \text{ см}^2$ каждая, поместили в керосин, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 2,0$, и подключили к источнику тока, напряжение на полюсах которого $U = 120 \text{ В}$. Определите работу, которую необходимо совершить, чтобы после отключения конденсатора от источника тока увеличить расстояние между его обкладками от $d_1 = 1,0 \text{ см}$ до $d_2 = 2,0 \text{ см}$.

Дано:

$$S = 100 \text{ см}^2 = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\epsilon = 2,0$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$d_1 = 1,0 \text{ см} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$A = ?$

Решение. Модуль заряда каждой из обкладок конденсатора $q = C_1 U = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U}{d_1}$. Энергия электростатического поля конденсатора до изменения расстояния между его обкладками $W_1 = \frac{qU}{2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d_1}$. После отключения конденсатора от источника тока заряды на его обкладках не изменяются.

Энергию электростатического поля конденсатора после увеличения расстояния между его обкладками определим следующим образом:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{(\epsilon_0 \epsilon S U)^2 d_2}{2d_1^2 \epsilon_0 \epsilon S} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2 d_2}{2d_1^2}.$$

Работа, которую необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние между обкладками конденсатора, равна приращению энергии электростатического поля конденсатора:

$$A = W_2 - W_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2 d_2}{2d_1^2} - \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d_1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S U^2}{2d_1} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right).$$

$$A = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 2,0 \cdot 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 120^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \left(\frac{2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} - 1 \right) =$$

$$= 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 0,13 \text{ мкДж}.$$

Ответ: $A = 0,13 \text{ мкДж}$.

Упражнение 17

1. Определите энергию электростатического поля конденсатора ёмкостью $C = 0,20 \text{ мкФ}$, если напряжение на нём $U = 200 \text{ В}$.

2. Модуль напряжённости однородного электростатического поля между обкладками плоского воздушного конденсатора $E = 200 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Определите расстояние между обкладками, если площадь каждой из них $S = 100 \text{ см}^2$, а энергия электростатического поля конденсатора $W = 35,4 \text{ мкДж}$.

3. Энергия электростатического поля заряженного плоского конденсатора $W_1 = 5 \text{ мкДж}$, если между его обкладками находится керосин, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon_1 = 2$. Определите энергию поля этого конденсатора, если пространство между его обкладками будет заполнено маслом, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon_2 = 2,5$.

4. Плоский конденсатор, площадь каждой обкладки которого $S = 40 \text{ см}^2$, а расстояние между ними $d = 8,0 \text{ мм}$, заполнен трансформаторным маслом, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 2,5$. Определите энергию и модуль напряжённости электростатического поля конденсатора, если напряжение на нём $U = 200 \text{ В}$.

5. Плоский конденсатор подключили к источнику тока и зарядили до напряжения $U_1 = 220 \text{ В}$. Отключив конденсатор от источника тока, увеличили расстояние между его обкладками от $d_1 = 1,0 \text{ см}$ до $d_2 = 3,0 \text{ см}$. Определите модуль напряжённости электростатического поля и напряжение между обкладками конденсатора после их раздвижения.

6*. Электрон влетает в плоский воздушный конденсатор параллельно ребру его обкладки (рис. 122) со скоростью, модуль которой $v = 6,5 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Расстояние между обкладками $d = 5,0 \text{ мм}$, длина каждой из них $l = 50 \text{ мм}$. Определите напряжение на конденсаторе, если при движении в его электростатическом поле электрон сместился от первоначального направления на расстояние $h = 2,0 \text{ мм}$. Действием силы тяжести пренебречь.

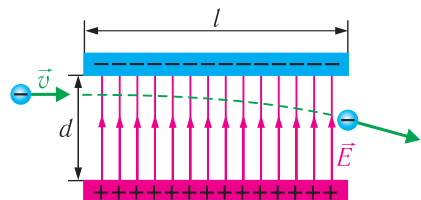
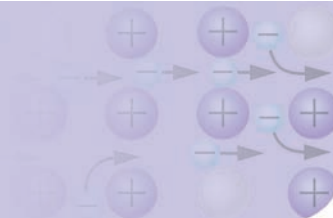


Рис. 122

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК



При изучении физики в 8 классе вы узнали, что:

- электрическим током называют направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц — носителей заряда;
- за направление тока в проводниках принято направление упорядоченного перемещения положительных носителей заряда;
- за силу тока принимают физическую скалярную величину, равную отношению заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, к промежутку времени: $I = \frac{q}{t}$.

Термин «электрический ток» и определение направления тока введены Ампером в 1820 г. Постоянный ток — модель электрического тока, в которой сила тока не зависит от времени и распределение заряда в проводнике остаётся неизменным.

Вы научились собирать электрические цепи и знаете, что обязательными их звеньями являются источник тока и потребитель. Источник тока обеспечивает необходимое напряжение на потребителе — устройстве, в котором нужно создать электрический ток и использовать что-то из его действий: тепловое, химическое, магнитное, световое. В данной главе мы рассмотрим условия существования тока и процессы, происходящие в электрической цепи, введём характеристики источника тока. Это стало возможным после изучения вами характеристик и свойств электростатического поля, особенно его потенциальности.

§ 22. Условия существования постоянного электрического тока. Сторонние силы. ЭДС источника тока

Как вы уже знаете, для возникновения электрического тока необходимо наличие свободных заряженных частиц, способных перемещаться

по проводнику под действием сил электрического поля. Такой электрический ток называют током проводимости. Что обеспечивает существование электрического тока в проводнике в течение длительного времени?

При изучении § 18 «Проводники в электростатическом поле» вы узнали, что движение свободных заряженных частиц в проводнике под действием сил электрического поля приводит к появлению индуцированных зарядов. Эти заряды создают электрическое поле, которое полностью компенсирует внешнее электрическое поле, поэтому движение свободных заряженных частиц в проводнике быстро прекращается.

Для поддержания в проводнике постоянного электрического тока необходимо, чтобы проводник являлся частью замкнутой цепи, содержащей источник тока, в котором осуществляется работа по перемещению зарядов против сил электрического поля.

Рассмотрим замкнутую электрическую цепь, состоящую из источника тока (участок ac) и металлического проводника (участок abc) (рис. 124).

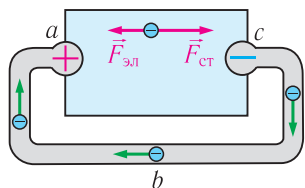


Рис. 124

В проводнике abc свободные электроны под действием сил электрического поля перемещаются от точки c к точке a . Чтобы движение носителей зарядов в цепи было продолжительным, электроны от точки a должны перемещаться к точке c . Самопроизвольно такое перемещение зарядов происходить не может, так как на них в противоположном направлении (от точки c к точке a) действуют силы электрического поля. Движение электронов против сил электрического поля возможно только под действием сил неэлектростатической природы, получивших название *сторонних сил*. Сторонние силы действуют на заряженные частицы только внутри источника тока.

Возникновение сторонних сил в источниках электрического тока обусловлено происходящими в них химическими реакциями, механическими, тепловыми и другими процессами.

В любом источнике тока сторонние силы совершают работу по разделению положительных и отрицательных зарядов, в результате чего один полюс источника заряжен положительно, а другой — отрицательно. Так, например, в химических источниках тока (гальванических элементах, аккумуляторах) разделение зарядов происходит при химических реакциях, в электромеханических индукционных генераторах — при совершении механической работы, в солнечных батареях — под воздействием энергии солнечного излучения и т. д.

Участок цепи, на котором заряды движутся под действием только электрических сил, называют *внешним* (различные потребители электрического тока, соединительные провода, измерительные приборы). Участок цепи, на котором заряды движутся под действием сторонних и электрических сил, называют *внутренним* (источник тока).

Основной характеристикой источника тока является *электродвижущая сила* (ЭДС). Обозначают её $\mathcal{E}$.



Термин «электродвижущая сила» неудачен, поскольку в данном случае речь не идёт ни о какой силе, измеряемой в ньютонах. Поэтому в дальнейшем мы будем использовать только сокращённое название ЭДС.

ЭДС $\mathcal{E}$ называют физическую скалярную величину, равную отношению работы $A_{\text{ст}}$ сторонних сил по перемещению положительного электрического заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному к значению этого заряда q :

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

Таким образом, ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного заряда внутри источника тока между его полюсами (положительного заряда от отрицательного полюса к положительному, отрицательного заряда, наоборот, от положительного полюса к отрицательному).

В СИ ЭДС, как и напряжение, измеряют в вольтах (В).

ЭДС является энергетической характеристикой источника тока. Энергия электрического заряда, перемещаемого внутри источника, увеличивается за счёт работы сторонних сил. При подключении проводника к полюсам источника эта энергия расходуется на перемещение заряда по всей электрической цепи.

Если электрическая цепь замкнута, то можно говорить, что ЭДС численно равна работе сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по всей замкнутой цепи, поскольку работа электрических сил в замкнутой цепи равна нулю.



1. Для существования постоянного электрического тока в проводнике необходимо, чтобы проводник являлся частью замкнутой цепи, содержащей источник тока, создающий и поддерживающий в проводнике электрическое поле в течение длительного промежутка времени.

2. Внутри источника тока перенос носителей заряда против сил электрического поля осуществляют силы неэлектростатической природы, называемые сторонними силами.

3. Участок цепи, на котором носители заряда движутся под действием только электрических сил, называют внешним. Участок цепи, на котором носители заряда движутся под действием сторонних и электрических сил, называют внутренним.

4. ЭДС называют физическую скалярную величину, равную отношению работы сторонних сил по перемещению положительного электрического заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному к значению этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}.$$

?

1. Каковы условия существования электрического тока?
2. Какие силы называют сторонними?
3. Какова роль источника тока в электрической цепи?
4. Что называют внешним участком электрической цепи? внутренним?
5. Каково направление движения свободных электронов на внешнем и внутреннем участках цепи?
6. Что называют ЭДС источника тока?
- 7*. Существует ли электрическое поле между полюсами источника тока в незамкнутой цепи? Изобразите схематически электрическое поле источника тока в замкнутой и незамкнутой цепи.

§ 23. Закон Ома для полной электрической цепи. КПД источника тока

Немецкий физик Георг Симон Ом экспериментально доказал, что сила электрического тока I в однородном металлическом проводнике зависит от напряжения U между его концами. На основании этого был сформулирован закон, названный законом Ома для участка электрической цепи:

$I = \frac{U}{R}$, где R — сопротивление участка цепи. Выясним, от чего и как зависит сила тока в замкнутой цепи, содержащей источник тока, т. е. в полной электрической цепи.

Закон Ома для полной электрической цепи. Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока с ЭДС $\mathcal{E}$ и сопротивлением r , которое называют внутренним, и резистора сопротивлением R (сопротивлением соединительных проводов пренебрегаем) (рис. 125). Пусть сила тока в цепи I , а напряжение на внешнем участке цепи U .

Закон Ома для полной цепи связывает силу тока I в цепи, ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока и полное сопротивление цепи $R + r$, которое складывается из сопротивлений внешнего (резистор) и внутреннего (источник тока) участков цепи. Эта связь может быть установлена теоретически на основании закона сохранения энергии.

Если через поперечное сечение проводника за промежуток времени t проходит заряд q , то работу сторонних сил по перемещению электрического заряда можно определить по формуле

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q.$$

С учётом определения силы тока $I = \frac{q}{t}$:

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}It. \quad (23.1)$$

В неподвижных проводниках неизменного химического состава в результате работы сторонних сил происходит увеличение только внутренней энергии внешнего и внутреннего участков цепи. Таким образом, при прохождении электрического тока в резисторе и источнике тока выделяется количество теплоты Q , которое может быть определено по закону Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2Rt + I^2rt. \quad (23.2)$$

На основании закона сохранения энергии

$$A_{\text{ст}} = Q. \quad (23.3)$$

Подставим формулы (23.1) и (23.2) в равенство (23.3) и в результате математических преобразований получим

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (23.4)$$

Произведение силы тока на сопротивление участка цепи часто называют падением напряжения на этом участке. Поэтому $IR = U$ — падение напряжения (напряжение) на внешнем участке цепи, Ir — падение напряжения на внутреннем участке цепи.

Выражая силу тока из формулы (23.4), получим

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (23.5)$$

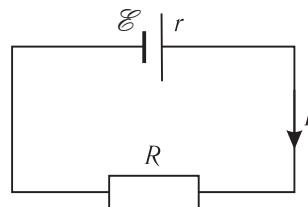


Рис. 125

Формула (23.5) является математическим выражением *закона Ома для полной электрической цепи*, согласно которому **сила тока I в полной электрической цепи прямо пропорциональна ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи $R + r$.**

Преобразуем формулу (23.4):

$$IR = \mathcal{E} - Ir,$$

так как $IR = U$, то

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (23.6)$$

Используя формулу (23.6), проанализируем различные режимы работы электрической цепи:

1. Цепь разомкнута ($I = 0$): тогда $U = \mathcal{E}$.

Таким образом, в разомкнутой цепи ЭДС источника тока равна напряжению между его полюсами. В этом случае можно измерить ЭДС источника тока, подключив к его полюсам вольтметр с бесконечно большим собственным сопротивлением, чтобы не нарушить режим разомкнутой цепи.

2. Сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю ($R \rightarrow 0$): тогда сила тока возрастает и достигает максимального значения. Падение напряжения на источнике тока при этом равно ЭДС, а напряжение между его полюсами — нулю.

Такой режим работы источника тока называют коротким замыканием, а максимальную для данного источника силу тока называют силой тока короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з}} = \frac{\mathcal{E}}{r},$$

где r — внутреннее сопротивление источника тока.

Для источников тока с незначительным внутренним сопротивлением (например, у автомобильных аккумуляторов $r \approx 0,01$ Ом) режим короткого замыкания чрезвычайно опасен, поскольку может привести к повреждению источника тока и даже быть причиной пожара.

Коэффициент полезного действия источника тока. При перемещении заряда q на внешнем участке цепи, напряжение на котором U , за промежуток времени t силы электрического поля совершают работу

$$A = Uq.$$

Используя выражение $I = \frac{q}{t}$, получим формулу для расчёта работы электрического тока, совершённой на внешнем участке цепи:

$$A = IUt.$$

В общем случае работа тока может превращаться в механическую работу $A_{\text{мех}}$ электродвигателей, расходоваться на увеличение внутренней энергии участка цепи (выделение количества теплоты Q), обеспечивать приращение химической энергии $\Delta E_{\text{хим}}$, а также преобразовываться в энергию возникающего электромагнитного излучения $E_{\text{изл}}$:

$$IUt = A_{\text{мех}} + Q + \Delta E_{\text{хим}} + E_{\text{изл}}.$$



Если к источнику тока подключён только электродвигатель, то $IUt = A_{\text{мех}} + Q$ и полезной работой будет $A_{\text{мех}}$.

Если прохождение тока сопровождается химическими реакциями (например, зарядка аккумулятора), то $IUt = \Delta E_{\text{хим}} + Q$ и полезная работа будет равна $\Delta E_{\text{хим}}$.

При работе электроосветительного оборудования $IUt = E_{\text{изл}} + Q$ и полезная работа равна $E_{\text{изл}}$.

При включении в цепь только электронагревательных приборов $IUt = Q$ и полезная работа равна Q .

При изучении физики в 8 классе вы узнали, что согласно экспериментально установленному закону Джоуля—Ленца количество теплоты, которое выделяется в проводнике при прохождении электрического тока, определяют по формуле $Q = I^2 R t$.

Следовательно, работа тока на произвольном участке цепи в общем случае не равна количеству теплоты, выделяемому на этом участке при прохождении тока, т. е. $IUt \neq I^2 R t$.

Равенство $IUt = I^2 R t$ выполняется только в том случае, если на участке цепи имеет место превращение энергии электрического поля, поддерживаемого источником тока, во внутреннюю энергию этого участка.

Таким образом, если внешним участком цепи является нагревательный элемент (или резистор), то формула для расчёта полезной работы электрического тока на внешнем участке цепи

$$A_{\text{полезн}} = I^2 R t.$$

Учитывая, что мощность $P = \frac{A}{t}$, получим выражение для определения полезной мощности тока на внешнем участке цепи:

$$P_{\text{полезн}} = I^2 R = IU.$$

Поскольку работа сторонних сил источника тока

$$A_{\text{ст}} = A_{\text{полн}} = I \mathcal{E} t,$$

то мощность, развиваемая сторонними силами источника тока при наличии в цепи только нагревательного элемента:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{полн}} = I\mathcal{E} = IU + I^2r.$$

Следовательно, $P_{\text{полн}} = P_{\text{полезн}} + I^2r$.

Отношение полезной мощности $P_{\text{полезн}}$ тока на внешнем участке цепи к полной мощности $P_{\text{полн}}$, развиваемой сторонними силами источника тока, называют коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока в данной цепи:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \% = \frac{A_{\text{полезн}}}{A_{\text{полн}}} \cdot 100 \%.$$

Например, при зарядке аккумулятора источником тока с ЭДС $\mathcal{E}$ при силе зарядного тока I КПД этого источника определяют по формуле

$$\eta = \frac{\Delta E_{\text{хим}}}{I\mathcal{E}t} \cdot 100 \%.$$

Если внешний участок цепи — нагревательный элемент, то

$$P_{\text{полезн}} = I^2R, \quad P_{\text{полн}} = I^2(R+r).$$

Тогда КПД источника тока

$$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100\%.$$



1. Сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи (закон Ома для полной электрической цепи):

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

2. В разомкнутой электрической цепи ЭДС источника тока равна напряжению между его полюсами.

3. Короткое замыкание — режим работы источника тока, при котором сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю, а сила тока достигает максимального для данного источника тока значения.

4. Отношение полезной мощности тока на внешнем участке цепи к полной мощности, развиваемой сторонними силами источника тока, называют коэффициентом полезного действия источника тока в данной цепи:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100\%.$$

?

1. Сформулируйте закон Ома для полной цепи.
2. Как можно измерить ЭДС источника тока?
3. Какой режим работы электрической цепи соответствует короткому замыканию?
4. Что понимают под силой тока короткого замыкания?
5. Что понимают под полезной работой электрического тока? полной работой источника тока?
6. Как определить полезную мощность электрического тока? полную мощность источника тока?
7. Что называют коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока?

Примеры решения задач

Пример 1. Резистор сопротивлением $R = 3,0$ Ом подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 8,0$ В и внутренним сопротивлением $r = 1,0$ Ом. Определите полезную мощность тока и КПД источника тока в данной цепи.

Дано:

$$R = 3,0 \text{ Ом}$$

$$\mathcal{E} = 8,0 \text{ В}$$

$$r = 1,0 \text{ Ом}$$

$$P_{\text{полезн}} = ?$$

$$\eta = ?$$

Решение. Полезной является мощность тока на внешнем участке цепи, т. е. на резисторе $P_{\text{полезн}} = I^2 R$. С учётом закона

$$\text{Ома для полной цепи } I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \text{ получим } P_{\text{полезн}} = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}.$$

$$P_{\text{полезн}} = \frac{64 \text{ В}^2 \cdot 3,0 \text{ Ом}}{(3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом})^2} = 12 \text{ Вт}.$$

КПД источника тока в данной цепи определим по формуле $\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100\%$.

$$\eta = \frac{3,0 \text{ Ом}}{3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом}} \cdot 100\% = 75\%.$$

Ответ: $P_{\text{полезн}} = 12 \text{ Вт}$, $\eta = 75\%$.

Пример 2. Электродвигатель в сети постоянного тока с напряжением $U = 120$ В потребляет ток силой $I = 6,0$ А. Найдите сопротивление его обмотки, если КПД электродвигателя $\eta = 80\%$.

Дано:

$$U = 120 \text{ В}$$

$$I = 6,0 \text{ А}$$

$$\eta = 0,80$$

$$R = ?$$

Решение. Мощность, потребляемую электродвигателем, определим по формуле $P_{\text{полн}} = IU$ (1).

Часть этой мощности затрачивается на нагревание обмотки: $P = I^2 R$, а часть — превращается в полезную механическую мощность $P_{\text{полезн}}$ электродвигателя. На основании закона сохранения энергии $P_{\text{полн}} = I^2 R + P_{\text{полезн}}$ (2).

Используя формулы (1) и (2), запишем выражение для нахождения полезной мощности электродвигателя:

$$P_{\text{полезн}} = P_{\text{полн}} - I^2 R = IU - I^2 R \quad (3).$$

КПД электродвигателя определим по формуле $\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \%$.

С учётом формул (1) и (3) получим $\eta = \frac{IU - I^2 R}{IU} = 1 - \frac{IR}{U} \quad (4).$

Сопротивление обмотки электродвигателя выразим из формулы (4):

$$R = \frac{U(1-\eta)}{I}.$$

$$R = \frac{120 \text{ В} \cdot (1-0,80)}{6,0 \text{ А}} = 4,0 \text{ Ом}.$$

Ответ: $R = 4,0 \text{ Ом}.$

Упражнение 18

1. Сила тока в цепи $I = 1,5 \text{ А}$. Определите работу сторонних сил за промежуток времени $t = 1,0 \text{ мин}$, если ЭДС источника тока $\mathcal{E} = 6,0 \text{ В}$.

2. Резистор сопротивлением $R = 2 \text{ Ом}$ подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 5 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,5 \text{ Ом}$. Определите силу тока в цепи и падение напряжения на внешнем и внутреннем участках электрической цепи.

3. Реостат подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 4 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$. Постройте график зависимости силы тока от сопротивления части реостата, по которой проходит ток, $I = I(R)$.

4. При подключении к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 2,2 \text{ В}$ резистора сопротивлением $R = 4,0 \text{ Ом}$ сила тока в цепи $I = 0,50 \text{ А}$. Определите силу тока при коротком замыкании источника тока.

5. Определите полную мощность, развиваемую источником тока с внутренним сопротивлением $r = 0,50 \text{ Ом}$, при подключении к нему резистора сопротивлением $R = 2,0 \text{ Ом}$, если напряжение на резисторе $U = 4,0 \text{ В}$.

6. Спираль нагревательного элемента сопротивлением $R = 38 \text{ Ом}$ подключена к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 2,0 \text{ Ом}$. Определите количество теплоты, которое выделится в спирали за промежуток времени $t = 10 \text{ мин}$.

7. Два параллельно соединённых резистора сопротивлениями $R_1 = 4,0 \text{ Ом}$ и $R_2 = 6,0 \text{ Ом}$ подключили к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 0,60 \text{ Ом}$. Определите напряжение на резисторах и силу тока в каждом из них.

8. Модуль напряжённости электростатического поля плоского конденсатора, подключённого к источнику постоянного тока (рис. 126), $E = 3,0 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. Определите расстояние между обкладками конденсатора, если ЭДС источника тока $\mathcal{E} = 0,16 \text{ кВ}$, его внутреннее сопротивление $r = 5,0 \text{ Ом}$, а сопротивление резистора $R = 15 \text{ Ом}$.

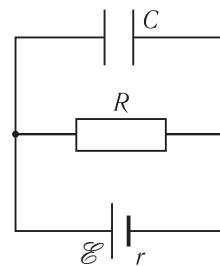


Рис. 126

9. Электродвигатель в сети постоянного тока с напряжением $U = 220 \text{ В}$ потребляет ток силой $I = 12 \text{ А}$. Определите механическую мощность и КПД электродвигателя, если сопротивление его обмотки $R = 5,0 \text{ Ом}$.

10*. В электрический чайник налили воду объёмом $V = 1,0 \text{ л}$ и подключили к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 140 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 4,0 \text{ Ом}$. Вольтметр, подключённый к полюсам источника тока, показывает напряжение $U = 120 \text{ В}$. Определите, на сколько увеличится температура воды за промежуток времени $\tau = 2,0 \text{ мин}$, если КПД чайника $\eta = 70 \%$. Плотность воды

$\rho = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удельная теплоёмкость воды $c = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

При изучении электрических явлений необходимо знать, возможно ли существование электрического тока в рассматриваемом веществе, поскольку все вещества делят на группы по их электрическим свойствам: проводники, полупроводники, диэлектрики. Чем эти группы веществ отличаются друг от друга? Как они проводят электрический ток?

Проводниками электрического тока могут быть вещества и в твёрдом, и в жидком, и в газообразном состояниях. Изучая данную тему, мы ответим на следующие вопросы: какие частицы являются носителями электрического заряда в данной среде? Как зависит сила тока от напряжения? Как зависит электрическая проводимость среды от температуры, излучения и других воздействий? Каково техническое применение электрического тока в различных средах?

§ 24. Электрический ток в металлах.

Зависимость сопротивления металлов от температуры. Сверхпроводимость

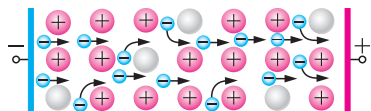


Рис. 127

Типичными представителями класса проводников являются металлы. В металлических проводниках носители электрического заряда — свободные электроны. Под действием внешнего электрического поля свободные электроны упорядоченно движутся, создавая электрический ток (рис. 127).

Природа электрического тока в металлах. Электронная проводимость металлов была впервые экспериментально подтверждена немецким физиком

К. Рикке в 1901 г. Суть опыта заключалась в следующем: через проводник, состоявший из трёх отпаянных и плотно прижатых друг к другу цилиндров — двух медных и одного алюминиевого (рис. 128), в течение года проходил ток одного и того же направления. За это время через проводник прошёл заряд более 3,5 МКл. После завершения опыта взвешивание показало, что массы цилиндров остались неизменными. Это явилось экспериментальным доказательством того, что перенос заряда при прохождении тока в металлах не сопровождается химическими процессами и переносом вещества, а осуществляется частицами, которые являются общими для всех металлов, т. е. электронами.

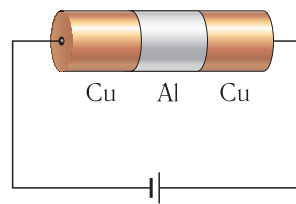


Рис. 128

Убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с проявлением инерции электронов. Идея таких опытов и первые результаты (1913 г.) принадлежат русским физикам Л. И. Мандельштаму и Н. Д. Папалекси.

В 1916 г. американский физик Р. Толмен и шотландский физик Т. Стюарт усовершенствовали методику этих опытов и выполнили количественные измерения, неопровержимо доказавшие, что ток в металлических проводниках обусловлен движением свободных электронов.

В этих опытах катушку с большим числом витков тонкой проволоки подключали к гальванометру и приводили в быстрое вращение вокруг своей оси (рис. 129). При резком торможении катушки в цепи возникал кратковременный ток, обусловленный инерцией носителей заряда. По направлению отклонения стрелки гальванометра было установлено, что электрический ток создают отрицательно заряженные частицы. При этом экспериментально полученное отношение

заряда каждой из этих частиц к её массе $\frac{q_0}{m_0}$ (удельный заряд) близко к удельному заряду электрона, полученному из других опытов. Так было экспериментально доказано, что носителями свободных зарядов в металлах являются электроны.

Вещества, обладающие электронной проводимостью, называют *проводниками первого рода*.

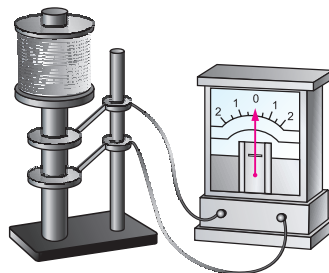


Рис. 129

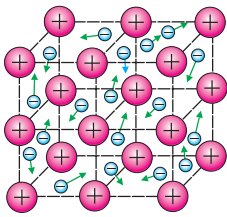


Рис. 130

В соответствии с классической электронной теорией проводимости металлов, созданной немецким физиком П. Друде и голландским физиком Г. Лоренцем в 1900—1904 гг., металлический проводник можно рассматривать как физическую систему, состоящую из свободных электронов и положительно заряженных ионов, колеблющихся около положений равновесия (рис. 130).

Появление свободных электронов при образовании металлического кристалла из нейтральных атомов можно упрощённо объяснить следующим образом. Электроны, находящиеся на внешних оболочках атомов, слабо связаны со своими ядрами. При образовании кристалла атомы сближаются на расстояние $r \sim 0,1$ нм и электроны начинают взаимодействовать не только со своими ядрами, но и с ядрами соседних атомов. В результате этого их взаимодействие с собственными ядрами значительно ослабевает, вследствие чего они теряют с ними связь и могут двигаться по всему кристаллу в любом направлении как свободные частицы. Атомы превращаются при этом в положительно заряженные ионы. В пространстве между ионами хаотично движутся, подобно частицам идеального газа, свободные электроны. Поэтому для описания движения электронов используют модель «электронный газ» — совокупность свободных электронов в кристаллической решётке металла. На рисунке 131 пунктирной линией показана траектория движения одного из электронов.

В этой модели электроны, упорядоченное движение которых является током проводимости, рассматривают как материальные точки, модуль потенциальной энергии взаимодействия которых пренебрежимо мал по сравнению с их кинетической энергией. Считают, что движение электронов под действием электрического поля подчиняется законам классической механики, а их столкновения с ионами кристаллической решётки

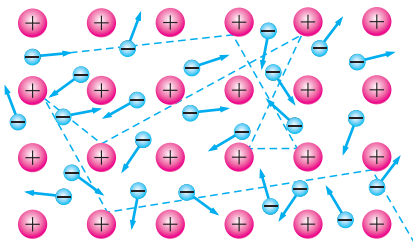


Рис. 131

являются неупругими, т. е. при столкновениях электроны полностью передают ионам кинетическую энергию своего упорядоченного движения. В промежутках между столкновениями свободные электроны совершают хаотическое тепловое движение и в то же время движутся упорядоченно и равноускоренно под воздействием электрического поля.



Модель электронного газа даёт возможность теоретически объяснить природу сопротивления и вывести закон Ома для участка цепи, не содержащего источника тока, на основе классической электронной теории проводимости металлов. Проанализируем упорядоченное движение электронов проводимости.

Пусть электрон движется с ускорением $\vec{a}$ в направлении, противоположном направлению напряжённости $\vec{E}$ электрического поля

(рис. 132): $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m_0} = -\frac{e\vec{E}}{m_0}$, где m_0 — масса электрона, e — элементарный электрический заряд (модуль заряда электрона). Тогда модуль средней скорости его направленного движе-

ния $\langle v \rangle = \frac{a\langle t^* \rangle}{2} = \frac{eE\langle t^* \rangle}{2m_0}$, где $\langle t^* \rangle$ — усреднённый промежуток времени между двумя последовательными столкновениями электрона с ионами кристаллической решётки.

Поскольку электрическое поле внутри однородного прямолинейного проводника с током однородное, то модуль напряжённости этого поля $E = \frac{U}{l}$, где l — длина проводника, U — напряжение между его концами. Тогда модуль средней скорости направленного движения электронов пропорционален напряжению между концами проводника: $\langle v \rangle \sim U$.

Сила тока в проводнике пропорциональна модулю средней скорости направленного движения электронов:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{eN}{t} = \frac{eN\langle v \rangle}{l} = \frac{enV\langle v \rangle}{l} = en\langle v \rangle S,$$

где q — модуль заряда электронов проводимости, $t = \frac{l}{\langle v \rangle}$ — время их прохождения по проводнику, N — количество электронов проводимости в проводнике, n — концентрация этих электронов, $V = Sl$ — объём проводника.

Следовательно, сила тока пропорциональна напряжению между концами проводника: $I \sim U$.

Зависимость сопротивления металлов от температуры. При изучении физики в 8 классе вы узнали, что сопротивление металлических проводников зависит от рода вещества (удельного сопротивления ρ) и его геометрических размеров (длины l и площади поперечного сечения S):

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

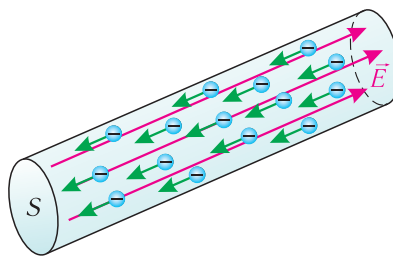


Рис. 132

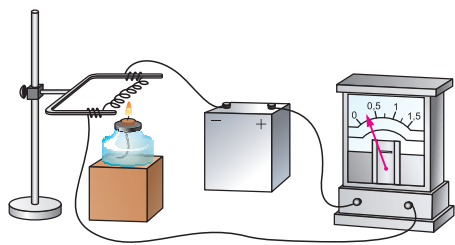


Рис. 133

А зависит ли сопротивление от температуры проводника?

Проведём опыт. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, проволоочной спирали и гальванометра (рис. 133). Опыт показывает, что при нагревании спирали показания гальванометра уменьшаются. Вывод очевиден: при увеличении температуры сопротивление металлов увеличивается.

Удельное сопротивление вещества металлического проводника зависит от концентрации свободных носителей заряда и числа их столкновений с ионами кристаллической решётки, совершающими колебательные движения около положений устойчивого равновесия.

В металлических проводниках концентрация свободных электронов практически постоянна для данного проводника и не зависит от температуры. Однако число столкновений свободных электронов с ионами кристаллической решётки с ростом температуры возрастает. Это приводит к возрастанию удельного сопротивления металлического проводника при повышении температуры.

При описании температурной зависимости удельного сопротивления проводника вводят *температурный коэффициент сопротивления* α , численно равный отношению приращению удельного сопротивления вещества проводника при приращении его температуры на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0(T - T_0)}, \quad (24.1)$$

где ρ_0 и ρ — удельные сопротивления вещества проводника соответственно при температуре $T_0 = 273 \text{ К}$ (0°C) и данной температуре T .

Из формулы (24.1) следует, что

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T),$$

где $\Delta T = T - T_0$ — приращение абсолютной температуры проводника, которое совпадает с приращением температуры по шкале Цельсия $\Delta T = \Delta t$. Таким образом, удельное сопротивление вещества металлического проводника возрастает с увеличением температуры.

График этой зависимости представлен на рисунке 134.

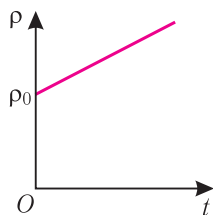


Рис. 134

Поскольку сопротивление проводника $R = \frac{\rho l}{S}$, то, не учитывая незначительную температурную зависимость отношения $\frac{l}{S}$, можно записать:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T) = R_0(1 + \alpha \Delta t), \quad (24.2)$$

где R_0 и R — сопротивления проводника соответственно при температуре $T_0 = 273 \text{ К}$ ($0 \text{ }^\circ\text{C}$) и данной температуре $T(t)$.

Для металлических проводников эти формулы применимы при температурах $T > 140 \text{ К}$. У всех металлов при повышении температуры их сопротивление возрастает, т. е. температурный коэффициент сопротивления α — величина положительная. Для большинства металлов (но не сплавов) при температурах от 0 для $100 \text{ }^\circ\text{C}$ среднее значение температурного коэффициента сопротивления $\langle \alpha \rangle \approx \frac{1}{273} \text{ К}^{-1}$.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют в специальных приборах — термометрах сопротивления (рис. 135).

Широкое распространение получили термометры сопротивления из чистых металлов, особенно платины и меди, которые конструктивно представляют собой металлическую проволоку, намотанную на жёсткий каркас (из кварца, фарфора, слюды), заключённый в защитную оболочку (из металла, кварца, фарфора, стекла) (рис. 136). Платиновые термометры сопротивления применяют для измерения температуры в пределах от -263 до $1064 \text{ }^\circ\text{C}$, медные — от -50 до $180 \text{ }^\circ\text{C}$.



Рис. 135



Рис. 136

Если при изготовлении электроизмерительных приборов требуются проводники, сопротивление которых должно как можно меньше зависеть от температуры окружающей среды, то используют специальные сплавы — константан и манганин. Температурный коэффициент сопротивления у константана в 820 раз, а у манганина в 510 раз меньше, чем у серебра.

Сверхпроводимость. При очень низких температурах сопротивление некоторых металлических проводников резко (скачком) уменьшается до нуля. Впервые это обнаружил в 1911 г. голландский физик Г. Камерлинг-Оннес (1853—1926). Он экспериментально установил, что при температуре $T \leq 4,2 \text{ К}$

(по современным измерениям 4,15 К) электрическое сопротивление ртути исчезает. Позже многочисленными опытами было установлено, что это явление характерно для многих проводников. Температуру, при которой электрическое сопротивление проводника обращается в нуль, называют *критической температурой* (T_k). Состояние проводника при этом называют *сверхпроводимостью*, а сам проводник — *сверхпроводником*. Каждый сверхпроводящий металл характеризуется своей критической температурой. Явление сверхпроводимости свойственно не только некоторым металлам, но и сплавам, полупроводникам и полимерам.

Зависимость сопротивления R сверхпроводника от абсолютной температуры T при низких температурах представлена на рисунке 137, график b ; для металла, не являющегося сверхпроводником, — на рисунке 137, график a .

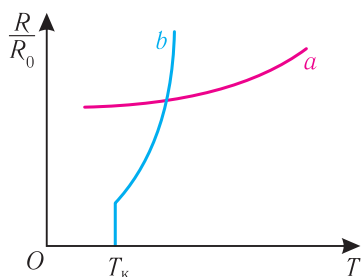


Рис. 137

металла, не являющегося сверхпроводником, — на рисунке 137, график a .

Если в сверхпроводнике создать электрический ток, то он будет существовать в нём неограниченно долго. При этом для поддержания тока нет необходимости в источнике тока. Это указывает на перспективу использования явления сверхпроводимости при передаче электрической энергии.

Сверхпроводящие соединения нашли применение в качестве материала обмоток электромагнитов для создания сильных маг-

нитных полей в установках управляемого термоядерного синтеза, а также в мощных электрических двигателях и генераторах. Разрабатывают проекты сверхпроводящих электронно-вычислительных машин. Уже созданы компактные интегральные схемы на сверхпроводниках, обладающие рядом преимуществ по сравнению с имеющимися аналогами. Возможности применения явления сверхпроводимости увеличатся, если будут найдены материалы, обладающие этим свойством при не очень низких температурах.



1. Электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов.

2. Металлический проводник можно рассматривать как физическую систему, состоящую из свободных электронов и положительно заряженных ионов.

3. Температурный коэффициент сопротивления численно равен отношению приращению удельного сопротивления проводника при приращении его температуры на 1 К:

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 \Delta T}.$$

4. Сопротивление металлического проводника возрастает с увеличением температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T).$$

5. Состояние, при котором электрическое сопротивление проводника обращается в нуль, называют сверхпроводимостью, а сам проводник — сверхпроводником.

?

1. Какова природа электрического тока в металлах?
2. Как было доказано, что носителями электрического заряда в металлах являются электроны?
3. Что понимают под электронным газом?
4. Как изменяется сопротивление проводника при повышении температуры?
5. Что называют температурным коэффициентом сопротивления?
6. На каком свойстве проводников основано действие термометра сопротивления?
7. В чём проявляется явление сверхпроводимости?

Пример решения задачи

Определите сопротивление алюминиевого проводника при температуре $t_2 = 90^\circ\text{C}$, если при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ его сопротивление $R_1 = 4,0\ \text{Ом}$. Температурный коэффициент сопротивления алюминия $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$.

Дано:
 $t_2 = 90^\circ\text{C}$
 $t_1 = 20^\circ\text{C}$
 $R_1 = 4,0\ \text{Ом}$
 $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1}$

 $R_2 = ?$

Решение. Согласно формуле (24.2) сопротивления проводника при температурах t_1 и t_2 соответственно

$$R_1 = R_0(1 + \alpha \Delta T_1), \quad R_2 = R_0(1 + \alpha \Delta T_2).$$

Решая систему уравнений, получим

$$R_2 = R_1 \frac{1 + \alpha \Delta T_2}{1 + \alpha \Delta T_1}.$$

Поскольку $\Delta T = \Delta t = t - t_0$, где $t_0 = 0,0^\circ\text{C}$, то $\Delta T_2 = 90\ \text{K}$, $\Delta T_1 = 20\ \text{K}$.

$$R_2 = 4,0\ \text{Ом} \cdot \frac{1 + 4,2 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1} \cdot 90\ \text{K}}{1 + 4,2 \cdot 10^{-3}\ \text{K}^{-1} \cdot 20\ \text{K}} = 5,1\ \text{Ом}.$$

Ответ: $R_2 = 5,1\ \text{Ом}$.

Упражнение 19

1. Определите удельное сопротивление алюминиевого проводника при температуре $t_0 = 0,0$ °С, если при температуре $t = 20$ °С его удельное сопротивление $\rho = 2,8 \cdot 10^{-8}$ Ом·м. Температурный коэффициент сопротивления алюминия $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

2. Сопротивление металлического проводника при температуре $t_0 = 0,0$ °С в $b = 1,5$ раза меньше, чем при температуре $t = 120$ °С. Определите температурный коэффициент сопротивления вещества проводника.

3. При температуре $t_0 = 0,0$ °С сопротивление вольфрамового проводника $R_0 = 40$ Ом. При прохождении электрического тока по проводнику его сопротивление увеличилось на $\Delta R = 100$ Ом. Определите, на сколько изменилась температура проводника. Температурный коэффициент сопротивления вольфрама $\alpha = 5,0 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

4. При температуре $t_1 = 20,0$ °С сопротивление никелинового проводника $R_1 = 30,0$ Ом. Проводник подключили к сети с напряжением $U = 120$ В. Определите температуру проводника, если по нему проходит электрический ток силой $I = 800$ мА. Температурный коэффициент сопротивления никелина $\alpha = 6,50 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

5*. При нагревании медного проводника, площадь поперечного сечения которого $S = 0,10$ мм², его сопротивление увеличилось на $\Delta R = 30$ мОм. Определите, на сколько возросла внутренняя энергия проводника. Для меди температурный коэффициент сопротивления $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, плотность

$D = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удельная теплоёмкость $c = 380 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удельное электрическое сопротивление $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м.

§ 25. Электрический ток в электролитах.

Законы электролиза Фарадея

При изучении предыдущего параграфа вы узнали, что в металлах перенос заряда не сопровождается переносом вещества, а носителями свободных зарядов являются электроны. Но существует класс проводников,хождение электрического тока в которых всегда сопровождается химическими изменениями и переносом вещества. Такими проводниками являются растворы многих солей, кислот и щелочей, а также расплавы солей и оксидов металлов.

Природа электрического тока в электролитах. Вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток, называют *электролитами*.

Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампы накаливания и ванны с дистиллированной водой, в которой находятся два угольных электрода (рис. 138). При замыкании цепи лампа светиться не будет, следовательно, дистиллированная вода не проводит электрический ток. Повторим

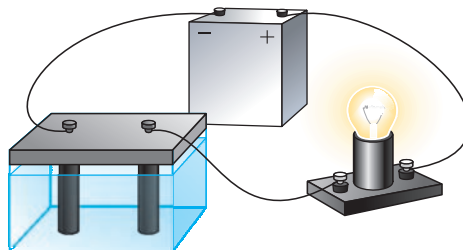


Рис. 138

опыт, добавив в дистиллированную воду небольшое количество соли, например, хлорида меди(II) CuCl_2 . В цепи проходит электрический ток, о чём наглядно свидетельствует свечение лампы. Следовательно, раствор соли в воде является проводником электрического тока, т. е. при растворении хлорида меди(II) в дистиллированной воде появились свободные носители электрического заряда.

Изучая химию, вы узнали, что при растворении солей, кислот и щелочей в воде происходит электролитическая диссоциация, т. е. распад молекул электролита на ионы.

В проведённом опыте хлорид меди(II) CuCl_2 в водном растворе диссоциирует на положительно заряженные ионы меди Cu^{2+} и отрицательно заряженные ионы хлора Cl^- :



Ионы Cu^{2+} и Cl^- в растворе при отсутствии электрического поля движутся хаотически. Под действием внешнего электрического поля на хаотическое движение частиц накладывается направленное движение положительно и отрицательно заряженных ионов (рис. 139). При этом положительно заряженные ионы Cu^{2+} движутся к электроду, подключённому к отрицательному полюсу источника тока (катоде), отрицательно заряженные ионы Cl^- — к электроду, подключённому к положительному полюсу источника тока (аноду). На аноде будет происходить процесс окисления ионов Cl^- до атомов хлора:

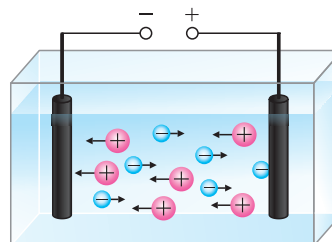
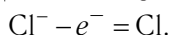
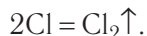
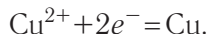


Рис. 139

Нейтральные атомы хлора образуют молекулы хлора, который выделяется на аноде:



На катоде будет происходить процесс восстановления ионов Cu^{2+} до нейтральных атомов и осаждение металлической меди:



Таким образом, свободными носителями электрического заряда в электролитах являются положительно и отрицательно заряженные ионы, образующиеся в результате электролитической диссоциации, а проводимость электролитов в отличие от проводимости металлов является ионной. Электролиты относят к *проводникам второго рода*.

Сопротивление электролитов. Для изучения сопротивления электролитов соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, электролитической ванны и амперметра (рис. 140).

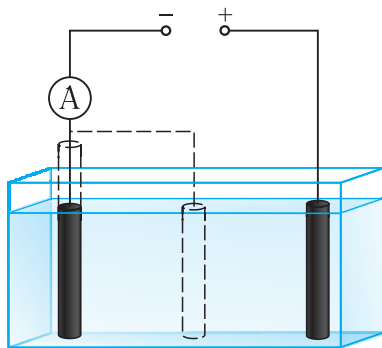


Рис. 140

Поддерживая постоянное напряжение между электродами, приблизим их друг к другу. Амперметр покажет увеличение силы тока в цепи. Таким образом, при уменьшении расстояния между электродами сопротивление электролита уменьшается.

Поместим один из электродов в электролит так, чтобы часть его выступала над поверхностью раствора. Показание амперметра уменьшится. Отсюда следует, что при уменьшении площади перекрытия электродов в электролите его сопротивление увеличивается.

Нагреем электролит на электрической плитке. Амперметр покажет увеличение силы тока в цепи. Следовательно, при увеличении температуры сопротивление электролита уменьшается.

Будем увеличивать напряжение между электродами в 2, 3, ..., n раз. Показания амперметра увеличиваются, причём сила тока в электролите изменяется прямо пропорционально напряжению, т. е. для электролитов выполня-

ется закон Ома $I = \frac{U}{R_{\text{эл}}}$.

Следует отметить, что при прохождении электрического тока через электролит проявляется тепловое действие тока, т. е. выполняется закон Джоуля — Ленца $Q = I^2 R_{\text{эл}} t$.

Законы электролиза Фарадея. При изучении химии вы узнали, что процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов, называют *электролизом*.

Первый закон электролиза был экспериментально установлен Фарадеем в 1833 г.

Масса m вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду q , прошедшему через электролит:

$$m = kq. \quad (25.1)$$

В формуле (25.1) коэффициент пропорциональности k называют *электрохимическим эквивалентом* данного вещества. Он численно равен массе вещества, выделившегося на одном из электродов при прохождении через электролит единичного электрического заряда. В СИ электрохимический эквивалент измеряют в килограммах на кулон $\left(\frac{\text{кг}}{\text{Кл}}\right)$. Значения электрохимических эквивалентов некоторых веществ приведены в таблице 2.

Таблица 2 — Электрохимический эквивалент вещества

Вещество	$k, 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$	Вещество	$k, 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$
Алюминий	9,32	Никель (двухвалентный)	30,4
Водород	1,04	Никель (трёхвалентный)	20,3
Кислород	8,29	Хлор	36,7
Медь (одновалентная)	65,9	Хром	18,0
Медь (двухвалентная)	32,9	Цинк	33,9

Поскольку $q = It$, где I — сила тока, t — промежуток времени прохождения тока через электролит, то

$$m = kIt.$$

Массу вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит электрического заряда q , можно определить, зная массу m_0 одного иона и число N осевших на этом электроде ионов:

$$m = m_0 N, \quad m_0 = \frac{M}{N_A},$$

где M — молярная масса вещества, N_A — постоянная Авогадро.

Тогда число ионов $N = \frac{m}{m_0} = \frac{m N_A}{M}$.

С другой стороны, число ионов, нейтрализовавшихся на электроде:

$$N = \frac{q}{q_0},$$

где q_0 — заряд одного иона. Так как заряд иона q_0 кратен элементарному заряду e , то $q_0 = en$, где n — валентность иона.

Значит, $\frac{m N_A}{M} = \frac{q}{en}$ и

$$m = \frac{M}{en N_A} q. \quad (25.2)$$

Сравнивая формулы (25.2) и (25.1), получим

$$k = \frac{M}{en N_A}. \quad (25.3)$$

Так как N_A и e — универсальные постоянные, то физическую величину $F = N_A e = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ в честь М. Фарадея называли *постоянной Фарадея*.

Таким образом, формулу (25.3) для определения электрохимического эквивалента вещества можно записать в виде

$$k = \frac{M}{Fn}.$$

Отношение $\frac{M}{n}$ называют *химическим эквивалентом* вещества. Тогда

$$k = \frac{x}{F}.$$

Фарадеем был сформулирован закон, называемый *вторым законом электролиза*, который устанавливает связь между электрохимическим и химическим эквивалентами вещества.

ким эквивалентами вещества: **электрохимические эквиваленты веществ пропорциональны их химическим эквивалентам:**

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{x_1}{x_2}.$$



Так как $k = \frac{M}{Fn}$, то первый закон электролиза можно записать:

$$m = \frac{M}{Fn} It. \quad (25.4)$$

Выражение (25.4) называют *объединённым законом Фарадея для электролиза*. Согласно этому закону масса вещества, выделившегося на каждом из электродов, пропорциональна молярной массе ионов этого вещества, силе тока и времени его прохождения через электролит и обратно пропорциональна валентности ионов вещества.

Используя закон электролиза, можно определить значение заряда электрона в школьной лаборатории. Допустим, через электролит в течение промежутка времени t проходил электрический ток силой I (можно измерить амперметром). При этом на электроде выделилось вещество массой m (можно измерить, взвесив электрод до и после прохождения тока через электролит). Тогда модуль заряда электрона определяют по формуле

$$e = \frac{M}{N_A mn} It.$$

Техническое применение электролиза. Электролиз нашёл различные применения в промышленности. Рассмотрим некоторые из них.

1. Нанесение защитных и декоративных покрытий на металлические изделия (гальваностегия).

Для предохранения металлов от окисления, а также для придания изделиям прочности и улучшения внешнего вида их покрывают тонким слоем благородных металлов (золотом, серебром) или мало окисляющимися металлами (хромом, никелем). Предмет, подлежащий гальваническому покрытию, например ложку (рис. 141), погружают в качестве катода в электролитическую ванну. Электролитом является раствор соли металла, которым осуществляется покрытие. Анодом служит пластина из того же металла. Пропуская через электролитическую ванну в течение определённого промежутка времени электрический ток, ложку покрывают слоем металла нужной толщины. Для наиболее равномерного покрытия ложки её нужно поместить между двумя или более

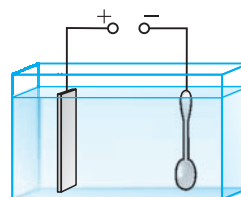


Рис. 141

анодными пластинами. После покрытия ложку вынимают из ванны, сушат и полируют.

2. Производство металлических копий с рельефных моделей (гальванопластика).

Для получения копий предметов (монет, медалей, барельефов и т. п.) делают слепки из какого-нибудь пластичного материала (например, воска). Для придания слепку электропроводности его покрывают графитовой пылью, погружают в ванну в качестве катода и получают на нём слой металла нужной толщины (рис. 142). Затем путём нагревания удаляют воск.

Процесс гальванопластики был разработан в 1836 г. русским академиком Б. С. Якоби (1801—1874).

3. Получение металлов из расплавленных руд и их очистка, электрохимическая обработка металлов.

Процесс очистки металлов происходит в электролитической ванне. Анодом служит металл, подлежащий очистке, катодом — тонкая пластина из чистого металла, а электролитом — раствор соли данного металла. Например, пластину из неочищенной меди помещают в качестве анода в ванну с раствором медного купороса, где катодом служит лист чистой меди (рис. 143). В загрязнённых металлах могут содержаться ценные примеси. Так, в меди часто содержатся никель и серебро. При пропускании через ванну электрического тока медь с анода переходит в раствор, из раствора на катоде выделяется чистая медь, а примеси выпадают в виде осадка или переходят в раствор.

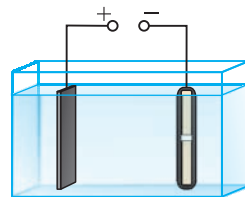


Рис. 142

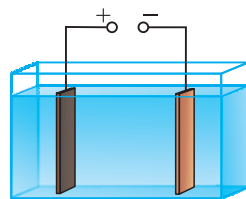


Рис. 143



1. Электролитами называют вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток.

2. Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов, образующихся в результате электролитической диссоциации растворённого вещества. Проводимость электролитов является ионной.

3. Процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов, называют электролизом.

4. Масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду, прошедшему через электролит:

$$m = kq.$$

?

1. Что называют электролитом?
2. Какой процесс называют электролизом?
3. Какова природа электрического тока в электролитах?
4. От чего зависит сопротивление электролитов?
5. Сформулируйте первый закон электролиза. Каков физический смысл электрохимического эквивалента?
6. Через электролитическую ванну, наполненную раствором сульфата меди(II) CuSO_4 , пропускают электрический ток. Изменится ли масса меди, выделяющейся на катоде за одинаковые промежутки времени, если увеличить напряжение между электродами? увеличить температуру раствора электролита? увеличить концентрацию раствора электролита? Почему?
7. Почему опасно прикасаться голыми руками к неизолированным металлическим проводам, по которым проходит электрический ток?
8. При никелировании предметов в качестве анода используют пластину из никеля. Будет ли осаждаться никель из раствора никелевой соли на предмете, если в качестве анода использовать пластину из какого-нибудь другого металла?

Примеры решения задач

Пример 1. Через электролитическую ванну, содержащую раствор серной кислоты, в течение промежутка времени $t = 60,0$ мин проходил ток силой $I = 1,20$ А. Выделившийся на катоде газообразный водород собран в сосуде вместимостью $V = 350$ см³. Определите температуру водорода, если его давление $p = 150$ кПа.

Дано:

$$t = 60,0 \text{ мин} = 3,60 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$I = 1,20 \text{ А}$$

$$V = 350 \text{ см}^3 = 3,50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$p = 150 \text{ кПа} = 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

T — ?

Решение. Для нахождения температуры водорода воспользуемся уравнением Клапейрона — Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

где M — молярная масса водорода ($M = 2,00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$), R — универсальная

газовая постоянная ($R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$). Следовательно, $T = \frac{pVM}{Rm}$.

Массу водорода, выделившегося на катоде, найдём, используя закон электролиза: $m = kIt$, где k — электрохимический эквивалент водорода ($k = 1,04 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$). С учётом этого температуру водорода определим по формуле

$$T = \frac{pVM}{RkIt}.$$

$$T = \frac{1,50 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 3,50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot 2,00 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 1,04 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 1,20 \text{ А} \cdot 3,60 \cdot 10^3 \text{ с}} = 281 \text{ К}.$$

Ответ: $T = 281 \text{ К}$.

Пример 2. Хромирование тонкой прямоугольной пластинки длиной $a = 3,0$ см и шириной $b = 5,0$ см в большой гальванической ванне осуществляется в течение промежутка времени $t = 2,0$ ч при силе тока $I = 1,5$ А. Определите толщину образовавшегося на пластинке слоя хрома. Плотность хрома $\rho = 7,18 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дано:

$$a = 3,0 \text{ см} = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$b = 5,0 \text{ см} = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$t = 2,0 \text{ ч} = 7,2 \cdot 10^3 \text{ с}$$

$$I = 1,5 \text{ А}$$

$$\rho = 7,18 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

h — ?

Решение. Для определения массы хрома, осаждённого на двух сторонах пластинки, воспользуемся

законом Фарадея $m = kIt$, где $k = 1,8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$.

С другой стороны, массу хрома можно выразить через плотность ρ и объём V : $m = \rho V = \rho ab2h$, где h — толщина образовавшегося на пластинке слоя хрома.

С учётом этого $2\rho abh = kIt$, откуда толщина слоя

$$\text{хрома } h = \frac{kIt}{2\rho ab}.$$

$$h = \frac{1,8 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{Кл}} \cdot 1,5 \text{ А} \cdot 7,2 \cdot 10^3 \text{ с}}{2 \cdot 7,18 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 9,0 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 90 \text{ мкм}.$$

Ответ: $h = 90 \text{ мкм}$.

Упражнение 20

1. Никелирование изделия двухвалентным никелем осуществлялось в течение промежутка времени $t = 20$ мин при силе тока $I = 15$ А. Определите массу слоя никеля, осаждённого на изделии.

2. Через водный раствор сульфата меди(II) CuSO_4 , находящийся в электролитической ванне, пропускают электрический ток силой $I = 4,0$ А. Определите число ионов меди, ежесекундно осаждающихся на катоде ванны.

3. В процессе электролиза двухвалентным никелем на катоде образуется слой массой $m = 0,15$ кг. Определите работу, совершённую электрическим током, если напряжение между электродами электролитической ванны $U = 4,0$ В.

4. Электроды, находящиеся в растворе сульфата меди(II) CuSO_4 , подключены к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,40$ Ом. Определите массу меди, осаждённой на катоде за промежуток времени $t = 10$ мин, если сопротивление раствора между электродами $R = 0,60$ Ом.

5. При электролизе слабого раствора серной кислоты на катоде электролитической ванны выделился газообразный водород объёмом $V = 1,5$ л, температура которого $t = 22$ °С и давление $p = 100$ кПа. Определите расход электроэнергии, если электролиз проходил при напряжении $U = 6,0$ В, а коэффициент полезного действия установки $\eta = 75$ %.

6*. Определите подъёмную силу воздушного шара, наполненного при нормальных условиях водородом, который был получен в результате электролиза подкислённой воды, если электрический ток силой $I = 300$ А пропускали через электролит в течение промежутка времени $t = 1,50 \cdot 10^3$ ч.

§ 26. Электрический ток в газах.**Самостоятельный и несамостоятельный разряды.****Плазма**

Газы при нормальных условиях не проводят электрический ток, т. е. являются диэлектриками. Это обусловлено тем, что газы состоят из нейтральных атомов (молекул). Однако при определённых условиях газы, в том числе и воздух, становятся проводниками. Выясним, при каких условиях это возможно.

Природа электрического тока в газах. Проведём опыт, позволяющий продемонстрировать изменение электрической проводимости газа (воздуха). Два металлических диска, заряженные разноимёнными зарядами и расположенные на некотором расстоянии друг от друга, соединим с электромет-

ром (рис. 144). Стрелка электрометра при этом отклонится на некоторый угол. Электрометр не разряжается, значит, при небольшой разности потенциалов между дисками воздух не проводит электрический ток.

Повторим опыт, нагревая пламенем (спиртовки, свечи) воздушный промежуток между дисками. Электрометр разряжается, т. е. через воздух проходит электрический ток (рис. 145). Вывод очевиден: в воздушном промежутке между дисками появились свободные носители электрического заряда.

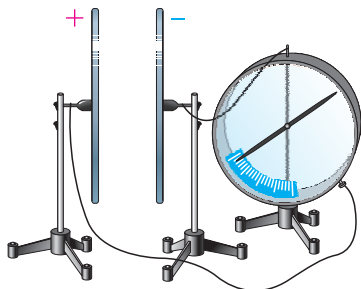


Рис. 144

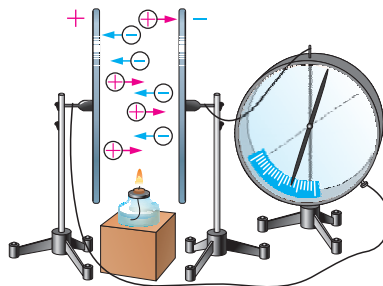


Рис. 145

Если убрать пламя, то электрический ток исчезнет, т. е. воздух между дисками опять станет диэлектриком.

Объясним результаты рассмотренного опыта. Нагревание газа пламенем приводит к образованию свободных электронов и положительно заряженных ионов. Процесс, в результате которого некоторые атомы (молекулы) газа теряют электроны и превращаются в положительно заряженные ионы, называют *ионизацией газа*. Минимальное значение энергии, необходимой для отрыва электрона от атома (молекулы), называют *энергией ионизации* атома (молекулы). Наряду с ионизацией может происходить присоединение образовавшихся при отрыве электронов к нейтральным атомам (молекулам) газа. Это приводит к образованию отрицательно заряженных ионов.

Под действием электрического поля в газе возникает направленное движение положительно заряженных ионов к отрицательному электроду (катоде) и направленное движение электронов и отрицательно заряженных ионов к положительному электроду (аноду). Таким образом, носителями электрического заряда в ионизированных газах являются положительно и отрицательно заряженные ионы и свободные электроны. Следовательно, проводимость газов — *ионно-электронная*. Прохождение электрического тока через ионизированный газ называют *газовым разрядом*.

После прекращения внешнего воздействия (в данном случае, нагревания пламенем) электрический ток в газе прекращается. Это обусловлено тем, что

при столкновении положительно заряженного иона с электроном они образуют нейтральный атом (молекулу) газа. Ионы разных знаков при столкновении также превращаются в нейтральные атомы (молекулы). Эти процессы называют *рекомбинацией* ионов. При рекомбинации освобождается энергия, равная энергии, затраченной на ионизацию.

Таким образом, для того чтобы в газе появились свободные носители электрического заряда, его атомы (молекулы) необходимо ионизировать. Это можно осуществить нагреванием газа до высокой температуры, воздействием на газ ультрафиолетовым, рентгеновским, радиоактивным излучениями и др.

Внешние воздействия, в результате которых происходит ионизация, называют *ионизаторами*. Разряд, возникающий в результате ионизации газа под действием внешнего ионизатора, называют *несамостоятельным*.

Вольт-амперная характеристика газового разряда. Для изучения разряда в газе удобно использовать стеклянную трубку с двумя электродами. Рассмотрим зависимость силы тока в газе от напряжения, приложенного к электродам трубки, — вольт-амперную характеристику газового разряда (рис. 146).

В результате действия внешнего ионизатора происходит ионизация газа в пространстве между электродами. Одновременно с этим происходит и обратный процесс — превращение ионов в нейтральные атомы (молекулы). При небольшом напряжении между электродами незначительное количество образовавшихся ионов и электронов достигает электродов, создавая электрический ток. Большинство ионов рекомбинируют, не успевая достигнуть электродов. При увеличении напряжения между элект-

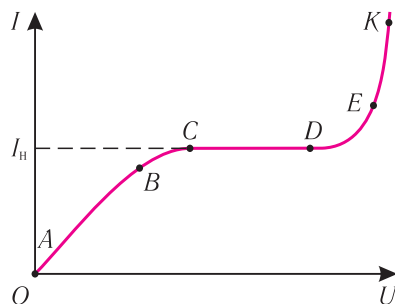


Рис. 146

родами возрастает количество заряженных частиц, достигших электродов, т. е. сила тока увеличивается. При этом сила тока прямо пропорциональна приложенному напряжению, т. е. выполняется закон Ома (участок графика *AB*).

При дальнейшем повышении напряжения пропорциональность нарушается (участок графика *BC*). Начиная с некоторого значения напряжения (точка *C*) все носители электрического заряда, образовавшиеся под действием ионизатора, достигают электродов, не успев рекомбинировать. При этом сила тока принимает максимальное значение и не зависит от напряжения (участок графика *CD*). Электрический ток, сила которого не зависит от напряжения, называют *током насыщения*.

При достаточно высоком напряжении свободные электроны под действием электрического поля ускоряются и приобретают кинетическую энергию,

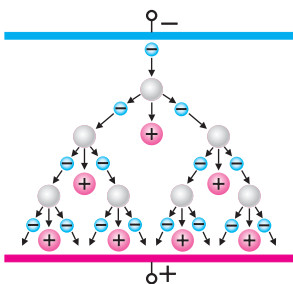


Рис. 147

достаточную для ионизации атомов (молекул) газа при соударении с ними. Процесс отрыва от атома (молекулы) газа одного или нескольких электронов, вызванный столкновением с этими атомами (молекулами) свободных электронов, называют *ионизацией электронным ударом*. Возникшие в результате ударной ионизации свободные электроны ускоряются электрическим полем и вызывают ионизацию новых частиц. Такие свободные электроны являются вторичным ионизатором. Это ведёт к лавинообразно-

му нарастанию числа вторичных свободных электронов и положительно заряженных ионов (рис. 147), а значит, и к увеличению силы разрядного тока. Однако сам разряд всё ещё остаётся несамостоятельным, так как после прекращения действия внешнего ионизатора он продолжается только до тех пор, пока отрицательно заряженные ионы и все электроны (первичные и вторичные) не достигнут анода, а положительно заряженные ионы — катода. Несамостоятельно лавинному разряду в газе соответствует участок графика DE на рисунке 146.

Однако в ряде случаев газовый разряд может существовать и после прекращения действия внешнего ионизатора. В этом случае имеющееся между электродами сильное электрическое поле является причиной сохранения газового разряда, который называют *самостоятельным*.

Для возникновения самостоятельного разряда недостаточно наличия одного лишь процесса ударной ионизации. Для поддержания разряда необходимо, чтобы в газе постоянно возникали носители электрического заряда без действия внешнего ионизатора. При движении положительно заряженных ионов к катоду их кинетическая энергия под действием поля увеличивается. Если энергия ионов достаточно велика, то при ударе о катод они могут выбивать с поверхности катода электроны. Этот процесс называют *вторичной электронной эмиссией* («эмиссия» означает «испускание»). При бомбардировке положительно заряженными ионами катода происходит его нагревание. При высокой температуре катода с его поверхности происходит испускание электронов. Такой процесс называют *термоэлектронной эмиссией*. В результате этих процессов в газе создаётся значительное число свободных электронов. В зависимости от давления газа, его температуры и напряжённости электрического поля вторичная электронная эмиссия и термоэлектронная эмиссия могут происходить одновременно (участок графика EK на рисунке 146). Таким образом, в отсутствие внешнего ионизатора самостоятельный разряд будет поддерживаться за счёт вторичной электронной эмиссии и (или) термоэлектронной эмиссии с поверхности катода.

Виды самостоятельного газового разряда и их применение. В зависимости от напряжённости электрического поля, давления газа, формы и вещества электродов различают следующие виды самостоятельного газового разряда: тлеющий, дуговой, коронный и искровой.

Тлеющий разряд характеризуется небольшой силой тока (десятки миллиампер), относительно высоким напряжением (десятки и сотни вольт), низким давлением газа (десятые доли миллиметра ртутного столба). Тлеющий разряд широко используют в различных газосветных трубках (рис. 148), применяемых для световой рекламы и декораций, лампах дневного света (рис. 149), неоновых лампах.



Рис. 148



Рис. 149

Дуговой разряд представляет собой столб ярко светящегося газа (рис. 150). Он характеризуется большой силой тока (десятки и сотни ампер) и сравнительно небольшим напряжением (несколько десятков вольт). Дуговой разряд является мощным источником света. Его используют в осветительных установках, для сварки и резки металлов (рис. 151), электролиза расплавов, в промышленных электропечах для плавки стали и др.

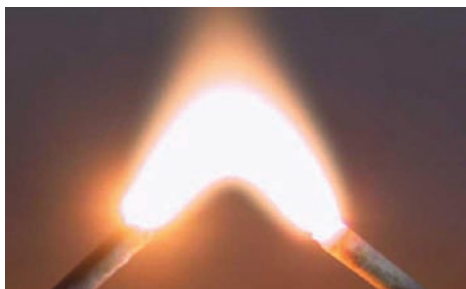


Рис. 150



Рис. 151

! В 1802 г. профессор физики Петербургской медико-химической академии В. В. Петров получил электрическую дугу. Он установил, что если присоединить к полюсам большой электрической батареи два кусочка древесного угля, привести их в соприкосновение, а затем слегка раздвинуть на небольшое расстояние, то между концами углей образуется яркое пламя, а сами концы углей раскаляются добела, испуская ослепительный свет (электрическая дуга). Впервые электрическая дуга была применена в 1876 г. русским инженером П. Н. Яблочковым для уличного освещения.

Коронный разряд возникает вблизи заострённой части проводника при атмосферном давлении под действием сильно неоднородного электрического поля. Он сопровождается слабым свечением, напоминающим корону (рис. 152), и характерным потрескиванием.

Коронный разряд используют в электрофильтрах для очистки промышленных газов от твёрдых и жидких примесей. Однако возникновение коронного разряда вокруг высоковольтных линий электропередачи нежелательно, так как приводит к потерям электрической энергии.

Искровой разряд наблюдают при высоком напряжении (рис. 153). Он сопровождается ярким свечением газа, звуковым эффектом, который создаётся резким повышением давления. Примером искрового разряда в природе служит молния (рис. 154).



Рис. 152



Рис. 153



Рис. 154

! Перед появлением молнии напряжение между облаком и поверхностью Земли достигает $U \sim 10^8 - 10^9$ В. Сила тока в молнии составляет $I \sim 10^5$ А, продолжительность разряда молнии $t \sim 10^{-6}$ с, диаметр светящегося канала $d \sim 10 - 20$ см. Извилистый вид молнии объясняется тем, что электрический разряд проходит через участки воздуха, имеющие наименьшее сопротивление. А такие участки расположены в воздухе случайным образом.

Плазма. При достаточно высоких температурах или под действием электромагнитного излучения происходит ионизация газа. Полностью или частично ионизированный газ, в котором концентрация положительных и отрицательных зарядов практически совпадает, называют *плазмой*. Плазма — самое распространённое состояние вещества во Вселенной (рис. 155).

В зависимости от степени ионизации различают частично ионизированную и полностью ионизированную плазму. В зависимости от скорости хаотического движения заряженных частиц различают холодную ($T < 10^5$ К) и горячую ($T > 10^6$ К) плазму. Примером холодной плазмы является плазма, образующаяся при всех видах электрического разряда в газах. Звёзды представляют собой гигантские сгустки горячей плазмы. Плазма заполняет космическое пространство между звёздами и галактиками. Плотность плазмы в космическом пространстве очень мала, в среднем одна частица на кубический сантиметр. В отличие от горячей плазмы звёзд температура межзвёздной плазмы является очень низкой. Верхний слой атмосферы Земли также представляет собой слабо ионизированную плазму. Причиной ионизации является ультрафиолетовое и рентгеновское излучения Солнца и других звёзд, быстрые заряженные частицы и др.

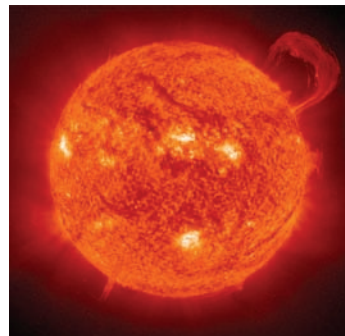


Рис. 155

Независимо от способа получения плазма в целом является электрически нейтральной, так как содержит равное число положительных и отрицательных зарядов. Проводимость плазмы растёт с увеличением числа ионизированных атомов (молекул). Полностью ионизированная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.



1. Носителями электрического заряда в ионизированных газах являются положительно и отрицательно заряженные ионы и свободные электроны.

2. Прохождение электрического тока через ионизированный газ называют газовым разрядом.

3. Разряд, возникающий в результате ионизации газа под действием внешнего ионизатора, называют несамостоятельным. Разряд, происходящий в результате ионизации газа после прекращения действия внешнего ионизатора, называют самостоятельным.

4. Ионизация электронным ударом — процесс отрыва от атома (молекулы) газа одного или нескольких электронов, вызванный столкновением с атомами (молекулами) газа электронов.

5. Плазма — полностью или частично ионизированный газ, в котором концентрация положительных и отрицательных зарядов одинакова.

?

1. Какова природа электрического тока в газах?
2. Как можно увеличить электрическую проводимость газов?
3. Какой разряд называют несамостоятельным?
4. Каков механизм возникновения несамостоятельного разряда в газах?
5. Что такое ионизация электронным ударом? При каких условиях она происходит в газах?
6. Какой разряд называют самостоятельным?
7. Каков механизм возникновения самостоятельного разряда в газах?
8. Какие виды самостоятельного разряда вы знаете? Приведите примеры их использования.
9. Что такое плазма? Как её можно получить?

§ 27. Электрический ток в полупроводниках. Собственная проводимость полупроводников

Полупроводники — широкий класс как неорганических, так и органических веществ в твёрдом или жидком состоянии, удельное сопротивление которых находится в пределах от 10^{-6} до 10^8 Ом·м (при $T=300$ К) и существенно убывает при увеличении температуры, а также изменяется при изменении освещения и введении сравнительно небольшого количества примесей. К полупроводникам относят ряд химических элементов (бор, углерод, кремний, германий, фосфор, мышьяк, сурьму, серу, селен, теллур и др.), множество оксидов и сульфидов металлов, а также других химических соединений.

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещённости. Изучить свойства полупроводников можно на опытах. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, полупроводника и миллиамперметра (рис. 156). Опыт показывает, что при нагревании полупроводника сила тока в цепи возрастает. Возрастание силы тока обусловлено тем, что при увеличении температуры сопротивление полу-

проводника уменьшается. Причём в отличие от металлов зависимость сопротивления полупроводников от температуры является нелинейной. С понижением температуры сопротивление металлов уменьшается, а полупроводников возрастает и вблизи абсолютного нуля становится таким же большим, как у диэлектриков. График зависимости удельного сопротивления от температуры чистого (не имеющего примесей) полупроводника приведён на рисунке 157.

Проведём ещё один опыт. Изменяя освещённость поверхности полупроводника, наблюдаем изменение показаний миллиамперметра (рис. 158). Результаты наблюдений означают, что при освещении поверхности полупроводника его сопротивление уменьшается.

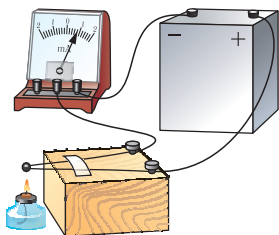


Рис. 156

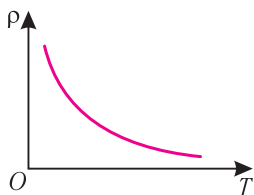


Рис. 157

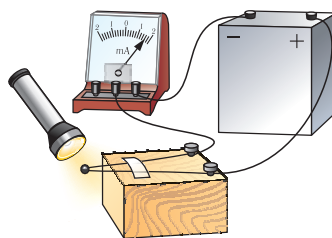


Рис. 158

Таким образом, уменьшить сопротивление полупроводника можно, либо нагревая его, либо воздействуя электромагнитным излучением, например, освещая его поверхность.

Природа электрического тока в полупроводниках. Экспериментально установлено, что при прохождении электрического тока в полупроводниках, как и в металлах, никаких химических изменений не происходит, т. е. перенос заряда при прохождении тока не сопровождается переносом вещества. Это свидетельствует о том, что свободными носителями электрического заряда в полупроводниках, как и в металлах, являются электроны.

Рассмотрим механизм проводимости полупроводников на примере кристалла германия Ge, валентность атомов которого равна четырём.

Атомы германия на внешней оболочке имеют четыре сравнительно слабо связанных с ядром валентных электрона. При этом каждый атом кристалла связан с четырьмя соседними атомами ковалентными связями. Два соседних атома объединяют два своих валентных электрона (по одному от каждого атома),

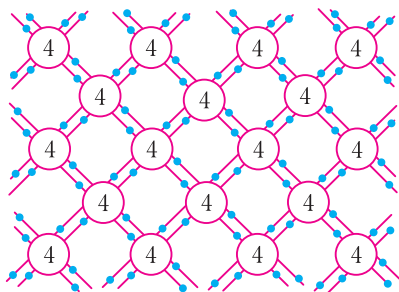


Рис. 159

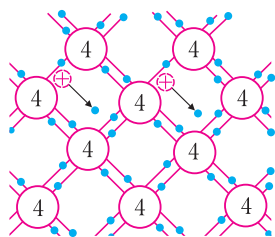


Рис. 160

которые образуют электронную пару. Поэтому все валентные электроны атома германия участвуют в образовании ковалентных связей. На рисунке 159 изображена плоская схема пространственной решётки кристалла германия. При температурах, близких к абсолютному нулю, ковалентные связи германия достаточно прочны, поэтому свободные электроны отсутствуют, и германий является диэлектриком.

Для того чтобы разорвать ковалентную связь и сделать электрон свободным, кристаллу германия необходимо сообщить некоторую энергию, например, нагревая кристалл или облучая его поверхность. При этом часть электронов получает энергию, достаточную для того, чтобы покинуть атомы и стать свободными.

Нейтральный атом, которому принадлежал освободившийся электрон, становится положительно заряженным ионом, а в ковалентных связях образуется вакантное место с недостающим электроном. Его называют *дыркой* (рис. 160).

Одновременно с процессом возникновения свободных электронов и дырок происходит процесс, при котором один из электронов (не свободный, а обеспечивающий ковалентную связь) перескакивает на место образовавшейся дырки и восстанавливает ковалентную связь. При этом положение дырки меняется, что можно моделировать как её перемещение. Таким образом, при отсутствии внешнего электрического поля в кристалле полупроводника наблюдается беспорядочное перемещение свободных электронов и дырок, концентрации которых в чистом полупроводнике одинаковые.

Дырки считают подвижными носителями положительного заряда, который равен модулю заряда электрона.



Дырочная проводимость в действительности обусловлена «эстафетным» перемещением по вакансиям от одного атома кристалла полупроводника к другому электронов, которые осуществляют ковалентную связь. Дырок как положительных зарядов, существующих реально, в действительности нет. Тем не менее представление о них является хорошей физической моделью, которая даёт возможность рассматривать электрический ток в полупроводниках на основе законов физики.

При наличии внешнего электрического поля на хаотическое движение свободных электронов и дырок накладывается их упорядоченное движение, т. е. возникает электрический ток. Причём движение свободных электронов происходит в направлении, противоположном направлению напряжённости $\vec{E}$ внешнего электрического поля, а движение дырок совпадает с направлением напряжённости $\vec{E}$ поля (рис. 161).

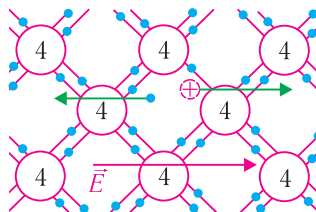


Рис. 161

Проводимость, обусловленная движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике, называют *собственной проводимостью* полупроводника.

При сообщении полупроводнику энергии концентрация свободных электронов, а следовательно, и дырок возрастает, так как увеличивается число разрывов ковалентных связей. Этим и объясняется уменьшение сопротивления полупроводника при его нагревании и облучении.

Техническое применение полупроводников. Приборы, работа которых основана на свойстве полупроводников изменять своё сопротивление при изменении температуры, называют термисторами или терморезисторами.

Терморезисторы (рис. 162) используют для защиты телефонных станций и линий от токовых перегрузок, для пуска защитных реле компрессоров холодильников; поджига люминесцентных ламп; для подогрева дизельного топлива; в различных электронагревательных устройствах: нагревательных решётках тепловентиляторов, сушилках для обуви.



Рис. 162

Приборы, работа которых основана на свойстве полупроводников изменять своё сопротивление при изменении освещённости их поверхности, называют фоторезисторами или фотосопротивлениями (рис. 163). Их используют для регистрации слабых потоков света, при сортировке и счёте готовой продукции, для контроля качества и готовности самых различных деталей; в полиграфической промышленности для обнаружения обрывов бумажной ленты, контроля количества листов бумаги, подаваемых в печатную машину; в медицине, сельском хозяйстве и других областях.



Рис. 163



1. Электрический ток в полупроводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов и дырок.

2. Проводимость, обусловленную движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике, называют собственной проводимостью полупроводника.

3. Сопротивление полупроводников уменьшается при увеличении температуры и воздействии электромагнитного излучения.

?

1. Каково строение полупроводников (на примере кристалла германия)?
2. Какова природа электрического тока в полупроводниках?
3. Объясните механизм собственной проводимости полупроводников.
4. Как зависит сопротивление полупроводников от температуры? освещённости? Почему?
5. Может ли наблюдаться у полупроводников явление сверхпроводимости? Почему?
6. В чём отличие зависимости электрической проводимости металлических проводников, полупроводников и диэлектриков от температуры? Почему?
7. В каком случае полупроводник может проявлять свойства диэлектрика?
8. Приведите примеры использования полупроводниковых приборов.

§ 28. Примесная проводимость полупроводников. Электронно-дырочный переход

Изменить свойства полупроводников можно не только нагреванием или воздействием электромагнитного излучения, но и добавлением в чистый полупроводник примесей. Тогда в полупроводнике наряду с собственной проводимостью возникает примесная проводимость.

Примесная проводимость полупроводников. Проводимость, обусловленную наличием примесей в полупроводнике, называют *примесной проводимостью* полупроводника.

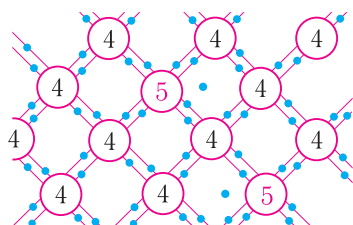


Рис. 164

Рассмотрим механизм этой проводимости на примере кристалла германия Ge, содержащего примесь атомов мышьяка As, валентность которых равна пяти.

Четыре валентных электрона атома мышьяка образуют ковалентные связи с соседними атомами германия (рис. 164). Пятые электроны атомов мышьяка не задействованы в образовании ковалентных связей и могут свободно перемещаться, почти как электроны в металлическом

проводнике. Проводимость такого кристалла будет преимущественно электронной. Дырки, образующиеся в результате разрыва отдельных ковалентных связей между атомами германия, являются неосновными носителями электрического заряда, так как их концентрация мала по сравнению с концентрацией свободных электронов. Такие полупроводники называют *электронными полупроводниками* или *полупроводниками n -типа* (от лат. *negativ* — отрицательный).

Примеси, поставляющие в полупроводники свободные электроны без возникновения равного им количества дырок, называют *донорными* (отдающими). Удельное сопротивление полупроводника с содержанием таких примесей резко уменьшается и может приближаться к удельному сопротивлению металлического проводника.

Теперь рассмотрим механизм примесной проводимости полупроводника на примере кристалла германия Ge, содержащего примесь атомов индия In, валентность которых равна трём.

Валентные электроны атома индия образуют ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия (рис. 165). На образование связи с четвёртым атомом германия у атома индия электрона нет. Поэтому возле каждого атома индия одна из ковалентных связей будет незаполненной, т. е. возникает дырка. Этот недостающий электрон может быть захвачен атомом индия из ковалентной связи соседних атомов германия. Но при этом дырка образуется на том месте, где до этого находился электрон.

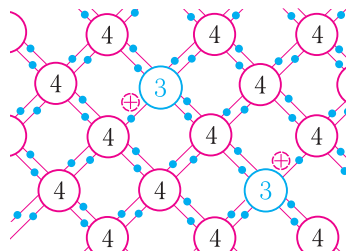


Рис. 165

В результате введения такой примеси в кристалле разрывается множество ковалентных связей и образуются дырки. Проводимость такого кристалла будет преимущественно дырочной. Свободные электроны, которые возникают за счёт собственной проводимости полупроводника, являются неосновными носителями электрического заряда, так как их концентрация мала по сравнению с концентрацией дырок. Такие полупроводники называют *дырочными полупроводниками* или *полупроводниками p -типа* (от лат. *positiv* — положительный).

Примеси, наличие которых в полупроводнике приводит к образованию дырок, не увеличивая при этом числа свободных электронов, называют *акцепторными* (принимающими). Удельное сопротивление полупроводников, содержащих акцепторные примеси, также резко уменьшается.

Электронно-дырочный переход. Рассмотрим полупроводник, одна часть которого содержит донорную примесь и поэтому является полупроводником n -типа, а вторая — акцепторную примесь и является полупроводником p -типа. В зоне контакта образуется тонкий слой, который называют электронно-дырочным переходом или n – p -переходом. Концентрация свободных электронов в n -области значительно выше, чем в p -области, соответственно концентрация дырок в p -области значительно больше их концентрации в n -области. Из-за того, что через границу раздела происходит диффузия электронов из n - в p -область и диффузия дырок из p - в n -область, на границе n - и p -областей появляется электрическое поле. Оно препятствует дальнейшему переходу основных носителей заряда через границу раздела. Иными словами, в зоне перехода между полупроводниками n - и p -типов образуется запирающий слой (рис. 166).

Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампочки и полупроводника с n – p -переходом. При этом положительный полюс источника тока подключим к p -области, а отрицательный — к n -области (рис. 167). При замыкании цепи лампочка будет светиться. Вывод очевиден: в цепи проходит электрический ток.

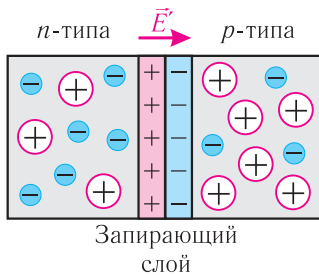


Рис. 166

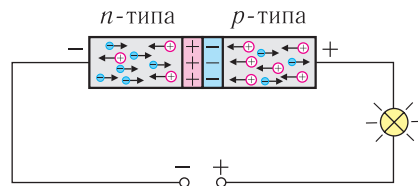


Рис. 167

Объясним наблюдаемое явление. Под действием электрического поля, созданного источником тока, запирающий слой начнёт исчезать, так как напряжённость $\vec{E}$ внешнего электрического поля источника противоположна по направлению напряжённости $\vec{E}'$ поля запирающего слоя и практически полностью компенсирует её. Это приводит к возобновлению диффузии основных носителей заряда через n – p -переход: из области n в область p — электронов, а из области p в область n — дырок. При этом толщина n – p -перехода уменьшается, следовательно, уменьшается его сопротивление (рис. 168). В этом случае n – p -переход включён в прямом (пропускном) направлении.

А теперь подключим положительный полюс источника тока к n -области, а отрицательный — к p -области (рис. 169). При замыкании цепи лампочка

не светится, т. е. электрического тока в цепи нет.

Причина в том, что толщина запирающего слоя и, следовательно, его сопротивление увеличиваются, так как направление напряжённости $\vec{E}$ электрического поля, созданного источником, совпадает с направлением напряжённости $\vec{E}'$ поля запирающего слоя. В этом случае n - p -переход включён в обратном (запирающем) направлении и ток через n - p -переход практически отсутствует (если не учитывать ток, созданный неосновными носителями, концентрация которых мала по сравнению с концентрацией основных носителей тока).

Таким образом, n - p -переход в полупроводнике обладает односторонней проводимостью. На рисунке 170 представлена вольт-амперная характеристика прямого перехода — участок OB и обратного перехода — участок OA .

Полупроводниковый диод. Свойство односторонней проводимости n - p -перехода используют в полупроводниковых приборах, называемых диодами. Для получения n - p -перехода берут, например, кристалл германия с донорной примесью. Такой кристалл обладает электронной проводимостью (проводимостью n -типа). Если в одну из поверхностей кристалла германия вплавить индий, то вследствие диффузии атомов индия в поверхностном слое германия образуется область с проводимостью p -типа. Та часть кристалла, в которую атомы индия не проникли, по-прежнему имеет проводимость n -типа. Между двумя областями с проводимостями разных типов возникает n - p -переход (рис. 171).

В полупроводниковом диоде германий служит катодом, а индий — анодом. Схематическое обозначение диода приведено на рисунке 172.

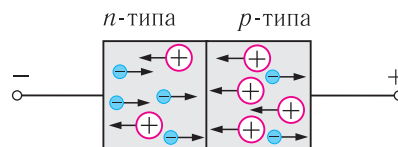


Рис. 168

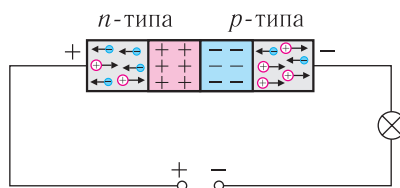


Рис. 169

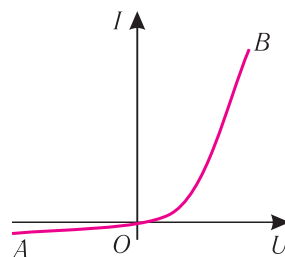


Рис. 170

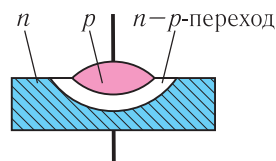


Рис. 171



Рис. 172



Рис. 173

Для защиты от внешних воздействий кристалл германия помещают в герметичный металлический или стеклянный корпус (рис. 173).

У полупроводниковых диодов высокий коэффициент полезного действия, они долговечны и миниатюрны по размерам. К недостаткам полупроводниковых диодов относится то, что они могут работать в ограниченном интервале температур (от -70°C до 125°C).

Полупроводниковые диоды являются основными элементами выпрямителей переменного тока и детекторов электромагнитных сигналов. С помощью полупроводниковых диодов можно осуществить непосредственное превращение энергии электромагнитного излучения в электрическую энергию. Такие диоды называют фотодиодами (рис. 174). Если к выходам фотодиода подключить, например, резистор, то в электрической цепи проходит электрический ток, возникающий в результате диффузии через $n-p$ -переход неосновных носителей электрического заряда, которые образуются под действием излучения, падающего на фотодиод. Причём сила электрического тока, проходящего через фотодиод, линейно зависит от интенсивности падающего на него света. В данном режиме фотодиод «работает» как источник тока (солнечная батарея). Если фотодиод включён в обратном направлении, то он «работает» как фоторезистор и его можно использовать для управления током в электрической цепи. Фотодиоды применяют в измерительной технике, системах автоматики.

Светоизлучающий диод (светодиод) — полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию непосредственно в световое излучение. Он представляет собой миниатюрный полупроводниковый диод, помещённый в прозрачный корпус (рис. 175). Используя светодиоды, изготавливают, например, светодиодные светильники (рис. 176).



Рис. 174



Рис. 175



Рис. 176



1. Проводимость, обусловленную наличием примесей в полупроводнике, называют примесной проводимостью полупроводника.

2. Примеси, поставляющие в полупроводники свободные электроны без возникновения равного им количества дырок, называют донорными. Полупроводники, содержащие донорные примеси, называют электронными полупроводниками или полупроводниками n -типа.

3. Примеси, наличие которых в кристалле полупроводника приводит к образованию дырок, не увеличивая при этом числа свободных электронов, называют акцепторными. Полупроводники, содержащие акцепторные примеси, называют дырочными полупроводниками или полупроводниками p -типа.

4. Электронно-дырочным переходом или n - p -переходом называют тонкий слой в зоне контакта полупроводников n - и p -типа. n - p -переход в полупроводнике обладает односторонней проводимостью.

?

1. Что называют примесной проводимостью полупроводников?
2. При каком условии в примесном полупроводнике возникает электронная проводимость? Приведите примеры.
3. При каком условии в примесном полупроводнике возникает дырочная проводимость? Приведите примеры.
4. Какой проводимостью будет обладать германий при введении в него небольшого количества фосфора? галлия? сурьмы?
5. Как влияет на проводимость металлических проводников, полупроводников и диэлектриков наличие в них небольшого количества примесей?
6. Объясните, как образуется n - p -переход.
7. Можно ли получить n - p -переход сплавлением олова в германий? Почему?
8. Определите тип проводимости полупроводников I и II (рис. 177), если диод включён в обратном (запирающем) направлении.
- 9*. На рисунках 178 и 179 изображены n - p -переходы двух диодов и направления движения основных носителей электрических зарядов. Определите, через какой из диодов проходит электрический ток. Почему?



Рис. 177



Рис. 178

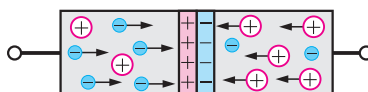


Рис. 179

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Как вы уже знаете, между заряженными телами (частицами), кроме гравитационного, существует и электромагнитное взаимодействие. Если заряды покоятся относительно определённой инерциальной системы отсчёта, электромагнитное взаимодействие между ними называют электростатическим. При движении электрически заряженных тел (частиц) проявляется составляющая электромагнитного взаимодействия — *магнитное взаимодействие*.

В этой главе вы познакомитесь с явлениями, в которых важную роль играет магнитное взаимодействие, обусловленное существованием магнитного поля, создаваемого постоянными магнитами, электрическим током или изменяющимся во времени электрическим полем.

§ 29. Действие магнитного поля на проводник с током. Взаимодействие проводников с током

То, что магниты взаимодействуют друг с другом, причём разноимённые полюса магнитов притягиваются, а одноимённые — отталкиваются (рис. 180), что распиленный пополам магнит превращается в два магнита, а железо при соприкосновении с магнитом намагничивается, впервые описал французский учёный Пьер де Мерикур в трактате «Письмо о магните» (1269 г.). В 1759 г. на взаимосвязь электричества и магнетизма указал Ф. Эпинус в трактате «Опыт теории электричества и магнетизма». В 8 классе вы узнали, что английский естествоиспытатель и придворный лекарь Уильям Гильберт (1544—1603) в трактате «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле. Новая физиология, доказанная множеством аргументов и опытов» (1600 г.),

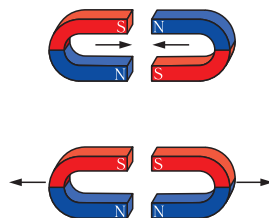


Рис. 180

содержащем описание более 600 опытов, проведённых учёным, подвёл итог работ всех своих предшественников и собственным восемнадцатилетним изысканиям. Вы также обсуждали, как датский физик Ганс Христиан Эрстед (1777—1851) обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная вблизи проводника, поворачивалась на некоторый угол при прохождении по проводнику электрического тока (рис. 181), стремясь сориентироваться перпендикулярно проводнику.

Открытие Эрстеда позволило Амперу сделать вывод, что магнитные свойства любого тела определяются замкнутыми электрическими токами, циркулирующими внутри этого тела и получившими название «амперовы токи» или «молекулярные токи» (рис. 182). Это означало, что магнитное взаимодействие обусловлено не особыми магнитными зарядами, а движением электрических зарядов — электрическим током.

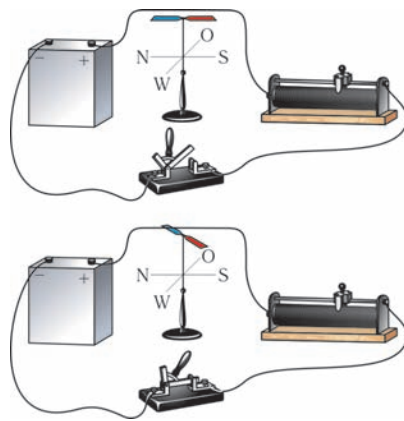


Рис. 181

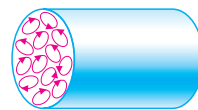


Рис. 182

Магнитное поле. Взаимодействие проводника с током и магнитной стрелки в опыте Эрстеда является взаимодействием электрического тока проводника с «амперовыми токами» в магнитной стрелке (гипотеза Ампера). Это взаимодействие осуществляется посредством *магнитного поля*.

Опыты показывают, что магнитное поле возникает при движении любых электрических зарядов — свободных электронов металлического проводника, ионов электролита и газа, электронов и дырок полупроводника, связанных зарядов при движении заряженного диэлектрика. Поскольку скорость движения заряда зависит от выбора системы отсчёта, магнитное поле одного и того же заряда в разных системах отсчёта будет различным. Если по отношению к определённой инерциальной системе отсчёта электрический заряд покоится, то в этой системе отсчёта он создаёт только электростатическое поле. Электрический заряд, движущийся относительно данной инерциальной системы отсчёта, создаёт в ней не только электрическое поле, но и магнитное, являющиеся компонентами единого электромагнитного поля.

Согласно представлениям классической электродинамики *магнитное поле* — особая форма материи, созданная движущимися (относительно опре-

делённой инерциальной системы отсчёта) электрическими зарядами или переменными электрическими полями. Посредством магнитного поля осуществляется взаимодействие между подвижными электрическими зарядами (а также магнитами). Иначе говоря, каждый движущийся в данной инерциальной системе отсчёта электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует с некоторыми силами на любые другие движущиеся в данном магнитном поле электрические заряды (постоянные магниты). Таким образом, о существовании магнитного поля можно судить по наличию силы, действующей на электрический заряд, движущийся относительно выбранной инерциальной системы отсчёта.



Современные научные представления не отвергают, а, наоборот, предсказывают частицы с магнитным зарядом — магнитные монополи. Однако такие частицы пока экспериментально не наблюдали.

Силы, действующие со стороны магнитного поля на находящиеся в нём проводники с током или движущиеся заряды, в дальнейшем будем называть *магнитными силами*.

Действие магнитного поля на проводник с током. Поскольку магнитное поле проводника с током действует с определённой силой на магнит (в опыте Эрстеда — на магнитную стрелку), то естественно предположить, что со стороны магнитного поля магнита на проводник с током должна действовать сила. Это предположение можно проверить на опытах.

Соберём электрическую цепь, изображённую на рисунке 183, а. При разомкнутой цепи действия со стороны магнитного поля дугообразного магнита на гибкий проводник не наблюдается. При замыкании цепи проводник приходит в движение: он либо втягивается в пространство между полюсами дугообразного магнита (рис. 183, б), либо выталкивается из него (рис. 183, в) при обратном расположении полюсов магнита (или при изменении направления тока).

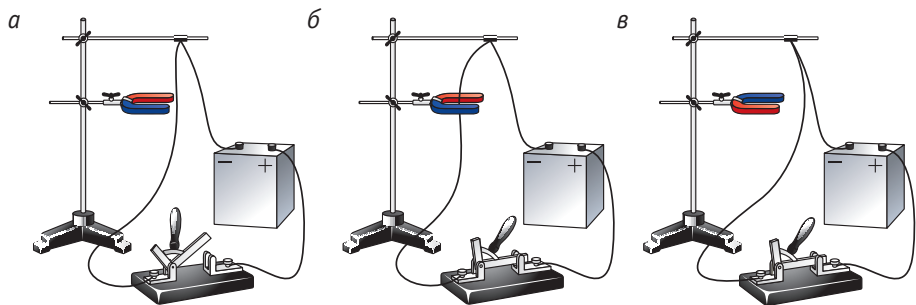


Рис. 183

Этот опыт ещё раз доказывает, что магнитное поле действует только на движущиеся заряды.

Действует ли магнитное поле на заряженные частицы, движущиеся в вакууме? Пусть в катодной трубке (рис. 184, *а*) от катода *К* к аноду *А* движется пучок электронов. В отсутствие внешнего магнитного поля он будет двигаться прямолинейно и перпендикулярно к поверхности анода. Если к трубке поднести магнит (рис. 184, *б*), то электронный пучок отклонится вниз. Поменяв местами расположение полюсов магнита, можно отклонить пучок вверх. Траектория электронов внутри трубки доступна наблюдению благодаря экрану *Э*, покрытому люминофором — веществом, светящимся под воздействием ударов электронов о него.

Во всех рассмотренных случаях на проводники с током (движущиеся заряженные частицы) действовала магнитная сила, которую можно рассматривать как результат взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с магнитным полем проводника с током (движущихся заряженных частиц).

Взаимодействие проводников с током. Открытие Эрстеда дало толчок к исследованиям по установлению связи между электрическими и магнитными явлениями. Ампер в 1820 г. провёл ряд экспериментов по изучению взаимодействия двух гибких первоначально параллельных и прямолинейных проводников с током. Ампер установил, что в случае, когда токи в проводниках проходят в противоположных направлениях, проводники отталкиваются (рис. 185, *а*), а когда в одном направлении — притягиваются (рис. 185, *б*). При отсутствии токов в проводниках они не взаимодействуют (рис. 185, *в*).

Магнитное поле одного проводника с током взаимодействует с током другого проводника посредством магнитной силы.

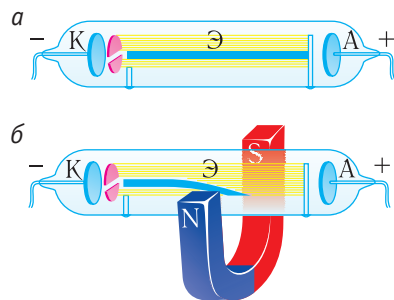


Рис. 184

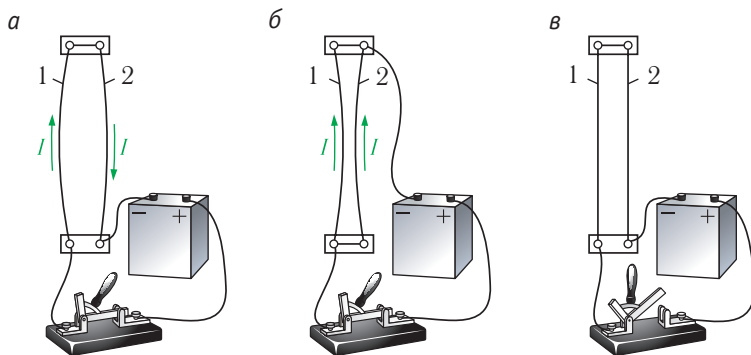


Рис. 185



Если рассматривать взаимодействие проводников с током более детально, то надо отметить, что оно имеет как магнитную, так и электрическую компоненты. Электрическое взаимодействие обусловлено зарядами, которые находятся на поверхности проводников с током. Утверждение о том, что проводники с токами одного направления притягиваются, является верным только в том случае, когда электрическое взаимодействие между проводниками значительно слабее, чем магнитное, т. е. если сопротивление проводников мало, а сила тока в них достаточна велика.

Магнитное взаимодействие двух параллельных проводников с током используют в СИ для определения единицы силы тока — ампера (А).

1 А — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, модуль которой равен $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Действие магнитного поля на рамку с током. Действие магнитного поля на проводник с током не всегда проявляется в притяжении или отталкивании. В этом можно убедиться на опыте. Подвесим на некотором расстоянии от проводника на тонких и гибких подводящих проводах маленькую (по сравнению с расстояниями, на которых магнитное поле заметно изменяется) рамку (рис. 186, а). При пропускании по проводнику и рамке электрического тока рамка повернётся и расположится так, что окажется в одной плоскости с проводником с током (рис. 186, б).

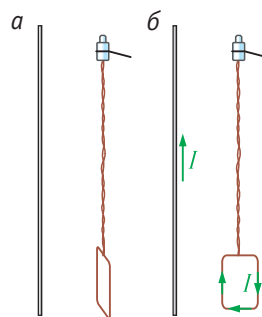


Рис. 186



Действием магнитного поля на ток в подводящих проводах можно пренебречь, если они обвивают друг друга (см. рис. 186) или расположены близко друг к другу. Действительно, провода находятся в одной и той же области поля и по ним проходят токи одинаковой силы и противоположного направления. Таким образом, силы, действующие на ток в подводящих проводах со стороны магнитного поля, равны по модулю и противоположно направлены. Следовательно, подвес остаётся в покое. Рамка, расположенная в непосредственной близости от проводника, будет не только поворачиваться, но ещё и притягиваться к проводнику с током, так как вблизи проводника существенно проявляется неоднородность магнитного поля, создаваемого током в проводнике.

Ориентирующее действие на рамку с током оказывает не только магнитное поле проводника с током. Поместим проволоочную рамку, способную свободно поворачиваться, между полюсами постоянного дугообразного магнита. Если по рамке проходит ток, она устанавливается так, что её плоскость перпендикулярна прямой, соединяющей полюса магнита (рис. 187). Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*, такое же, как и на стрелку компаса.

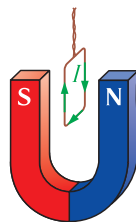


Рис. 187



1. Магнитное поле — особая форма материи, созданная движущимися (относительно определённой инерциальной системы отсчёта) электрическими зарядами или переменными электрическими полями.

2. Каждый движущийся электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует с определёнными силами на любые другие движущиеся электрические заряды.

3. Магнитная сила — сила, которая действует со стороны магнитного поля на находящиеся в нём проводник с током, движущийся заряд или магнит.

4. 1 А — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу магнитного взаимодействия, модуль которой равен $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

5. Магнитное поле оказывает ориентирующее действие на рамку с током и на магнитную стрелку.



1. Какие поля существуют в пространстве, окружающем движущийся электрический заряд?

2. Что представляет собой магнитное поле? Как его можно обнаружить?

3. Что называют магнитной силой?

4. Какой опыт доказывает, что магнитное поле действует только на движущиеся заряды?

5. Какое явление используют для определения единицы силы тока в СИ?

6. В чём проявляется действие магнитного поля на рамку с током?

7. В книге французского естествоиспытателя Араго «Гром и молния» приведены примеры перемагничивания стрелки компаса и намагничивания стальных предметов действием молнии. Как можно объяснить эти явления?

§ 30. Индукция магнитного поля.

Линии магнитной индукции

Изучая электростатику, вы узнали, что распределение поля в пространстве можно сделать «видимым», пользуясь представлениями о линиях напряжённости. При изучении физики в 8 классе вы узнали, что магнитные поля также можно изображать графически в виде магнитных линий. Для описания магнитного поля введём его основную характеристику, аналогичную напряжённости $\vec{E}$ электростатического поля. Такой характеристикой служит индукция магнитного поля $\vec{B}$ (или магнитная индукция), которая является векторной величиной и позволяет определить силу, действующую на проводник с током (движущийся заряд) в магнитном поле.

Направление индукции магнитного поля. Для определения направления индукции магнитного поля $\vec{B}$ используют ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током. Направление от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле, принимают за направление магнитной индукции.

Направление магнитной индукции $\vec{B}$ в том месте магнитного поля, где расположена небольшая плоская рамка с током, совпадает с направлением положительной нормали $\vec{n}$ к плоскости рамки. Направлением положительной нормали принято считать направление движения буравчика, рукоятку которого вращают в направлении тока в рамке. В исследуемом магнитном поле направление положительной нормали совпадает с направлением от южного полюса S к северному полюсу N магнитной стрелки (рис. 188).

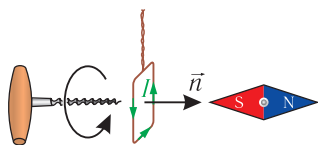


Рис. 188

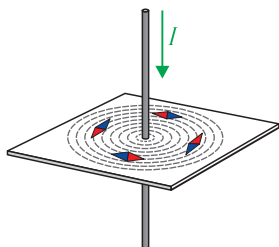


Рис. 189

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитные стрелки располагаются по касательным к окружностям (рис. 189), центры которых лежат на оси проводника.

На практике часто приходится иметь дело с магнитными полями электрических токов, проходящих по катушкам (соленоидам). В магнитном поле катушки с током магнитные стрелки устанавлива-

ются по касательным к замкнутым кривым, охватывающим витки катушки (рис. 190).

Линии магнитной индукции. Итак, исследуя магнитное поле, создаваемое проводником с током или постоянным магнитом, с помощью магнитной стрелки в каждой точке пространства можно определить направление магнитной индукции. Такое исследование позволяет графически представить пространственную структуру магнитного поля в виде линий магнитной индукции.

Линией индукции магнитного поля называют воображаемую линию в пространстве, касательная к которой совпадает с направлением индукции магнитного поля в каждой точке поля (рис. 191). Линии магнитной индукции непрерывны (не имеют ни начала, ни конца), замыкаются сами на себя. Это характерно для любых магнитных полей. Поля, обладающие таким свойством, называют *вихревыми*.

Очевидно, что через любую точку в магнитном поле можно провести только одну линию индукции. Поскольку индукция магнитного поля в любой точке пространства имеет определённое направление, то и направление линии индукции в каждой точке этого поля может быть только единственным. Это означает, что линии магнитной индукции, так же как и линии напряжённости электрического поля, не пересекаются.

Определить направление линий магнитной индукции можно, используя *правило буравчика*: если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока, то рукоятка буравчика поворачивается в направлении линий магнитной индукции. В случае прямолинейного проводника линии магнитной индукции представляют собой concentric окружности, которые находятся в плоскостях, перпендикулярных к проводнику с током (рис. 192).

Определить направление линий индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током можно также с помощью *правила правой руки*: если мысленно обхватить проводник правой рукой

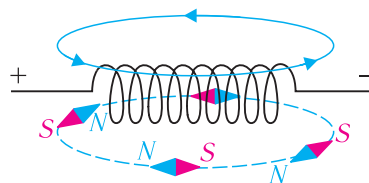


Рис. 190

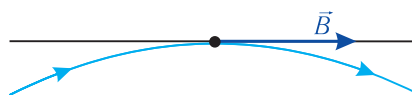


Рис. 191

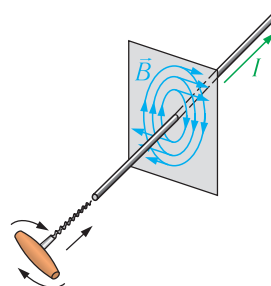


Рис. 192

так, чтобы большой палец указывал направление тока, то остальные пальцы окажутся согнуты в направлении линий магнитной индукции (рис. 193).

Картину линий магнитной индукции можно получить, используя мелкие железные опилки, которые в магнитном поле ведут себя, как магнитные стрелки. На рисунке 194 показана картина магнитного поля прямолинейного участка проводника с током. Картина магнитного поля кругового витка с током и графическое изображение линий магнитной индукции представлены на рисунке 195, а, б.

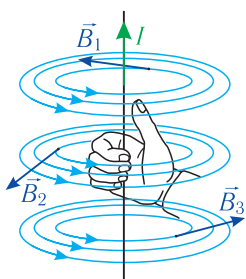


Рис. 193

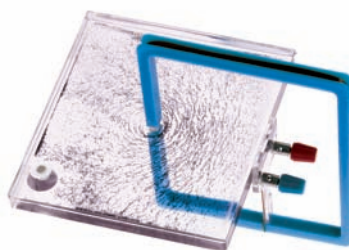


Рис. 194

Полагают, что линии индукции магнитного поля, созданного постоянным магнитом, направлены внутри магнита от его южного полюса S к северному полюсу N (рис. 196).

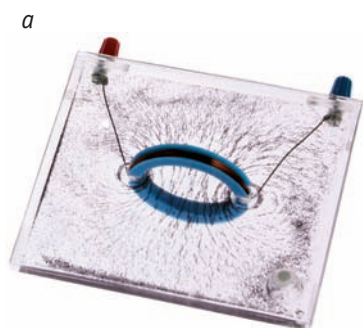


Рис. 195

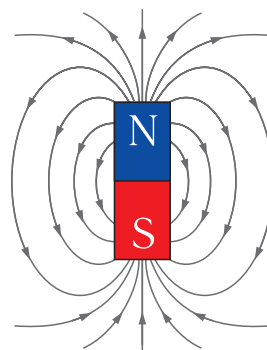
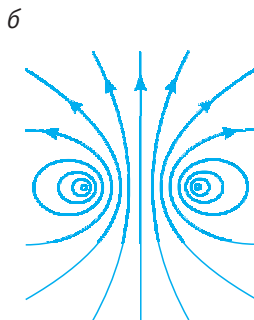


Рис. 196

Магнитное поле соленоида с током подобно полю полосового магнита. На рисунке 197, а, б показана картина магнитного поля соленоида с током и дано графическое изображение линий индукции. Соленоид представляет собой цилиндрическую катушку, на которую виток к витку намотан провод. Если длина соленоида много больше его диаметра, то внутри центральной части соленоида линии индукции магнитного поля практически параллельны и направлены вдоль его оси. Расчётами можно показать, что численное значение магнитной индукции внутри длинного соленоида вдали от его торцов будет одинаковым во всех точках. Для наглядности на рисунках линии индукции изображают гуще в тех местах магнитного поля, где больше значение магнитной индукции (см. рис. 197, б). При этом на линии индукции изображают стрелку в направлении индукции магнитного поля. Для крайних витков соленоида магнитное поле кругового витка с током, проходящим в направлении движения часовой стрелки, эквивалентно полю южного полюса постоянного магнита, а магнитное поле кругового витка с током, проходящим против направления движения часовой стрелки, эквивалентно полю северного полюса постоянного магнита (*правило часовой стрелки*).

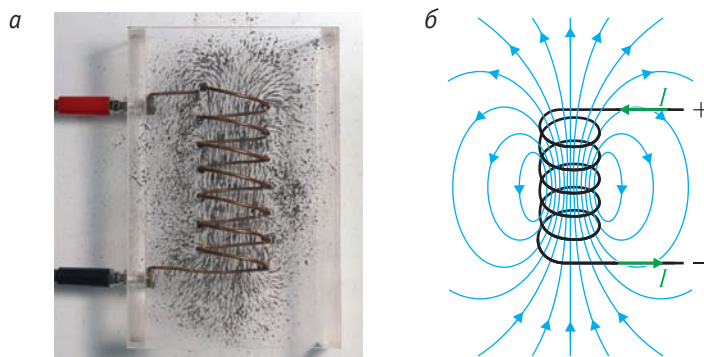


Рис. 197

Магнитное поле, индукция которого во всех точках одинакова, называют *однородным*. Линии индукции такого поля параллельны. В противном случае поле называют неоднородным. Магнитное поле внутри длинного соленоида практически однородно. Вблизи краёв соленоида магнитное поле уже не однородно. Не однородно и магнитное поле прямолинейного проводника с током (см. рис. 192).

Определение направления магнитной индукции. Для определения направления магнитной индукции можно воспользоваться любым из правил, сформулированных выше. Причём, пользуясь правилом буравчика, надо помнить, что направление тока — это направление упорядоченного движения положительных зарядов. Если на рисунке прямолинейный проводник с током изображён не в плоскости страницы, так как расположен перпендикулярно ей (рис. 198), и при этом ток направлен к читателю, то его условно обозначают точкой (рис. 199, *а*). В случае, если ток направлен от читателя, — крестиком (рис. 199, *б*). Так же (точка и крестик) обозначают векторы (магнитная индукция, сила и др.), если их направления перпендикулярны плоскости рисунка.

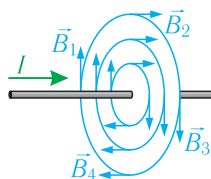


Рис. 198

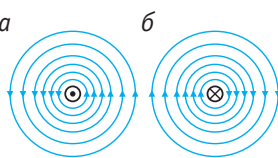


Рис. 199

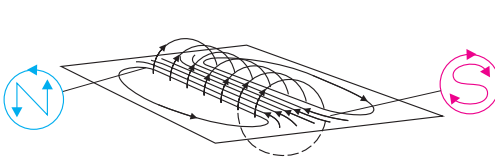


Рис. 200

Полюсы соленоида, а следовательно, и направление магнитной индукции, можно определить по правилу часовой стрелки (рис. 200) или правилу буравчика: при вращении рукоятки буравчика по току в витке поступательное движение острия буравчика укажет направление магнитной индукции внутри соленоида, а следовательно, и положение его северного полюса.



1. За направление индукции магнитного поля принимают направление от южного полюса *S* к северному полюсу *N* магнитной стрелки, свободно устанавливающейся в магнитном поле. Это направление совпадает с направлением положительной нормали к плоскости небольшой рамки с током, свободно сориентировавшейся в окрестности этой же точки магнитного поля.

2. Линией индукции магнитного поля называют воображаемую линию в магнитном поле, касательная к которой совпадает с направлением индукции магнитного поля в каждой точке.

3. Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты и не пересекаются.

4. Магнитное поле, индукция которого во всех точках одинакова, называют однородным.

?

1. Как графически изображают магнитное поле? Что называют линиями магнитной индукции?
2. Какие правила используют для определения направления магнитной индукции?
3. Какова картина линий магнитной индукции поля прямолинейного проводника с током? кругового витка с током? катушки с током? Как определяют направление линий магнитной индукции?
4. Какие поля называют вихревыми?
5. В чём отличие магнитного поля от электростатического?
6. Какое магнитное поле называют однородным?
7. На рисунке 201 схематически изображено магнитное поле кругового витка с током. Однородно ли магнитное поле витка? Почему?

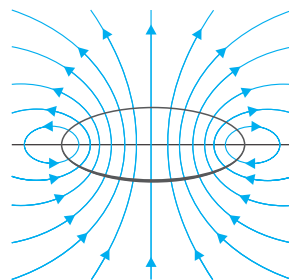


Рис. 201

Примеры решения задач

Пример 1. Пучок электронов движется так, как показано на рисунке 202, *а*. Определите направление линий индукции магнитного поля, образованного этим пучком.

Решение. Определить направление линий индукции магнитного поля, образованного движущимся пучком электронов, можно как по правилу буравчика, так и по правилу правой руки. Однако следует помнить, что эти правила сформулированы для движущихся положительных зарядов. Поэтому в данном случае надо учесть, что за направление электрического тока принято направление, противоположное движению электронов, образующих пучок. Тогда, если смотреть на линию индукции по направлению движения электронов, она будет соориентирована против направления движения часовой стрелки (рис. 202, *б*).

Пример 2. На рисунке 203 показано направление электрического тока в соленоиде. Определите магнитные полюсы соленоида.

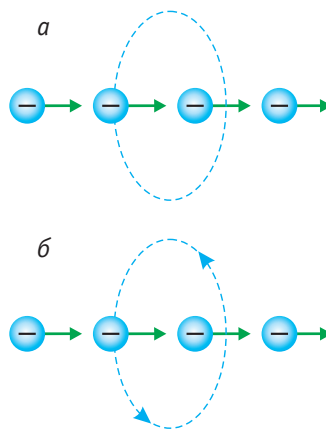


Рис. 202

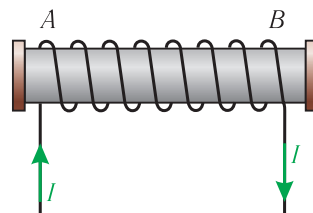


Рис. 203

Решение. В данной задаче для определения магнитных полюсов соленоида можно воспользоваться как правилом буравчика, так и правилом часовой стрелки. В первом случае будем мысленно вращать буравчик по направлению тока в витках соленоида. Остриё буравчика при этом перемещается вдоль оси соленоида от торца A к торцу B . Так как линии индукции внутри магнита направлены от южного полюса к его северному полюсу, то по аналогии можно сделать вывод, что у торца A — южный полюс соленоида, а у торца B — северный.

Проверим свой вывод, применив правило часовой стрелки. Если смотреть со стороны торца A соленоида, то видно, что направление тока в витке совпадает с направлением движения часовой стрелки. Следовательно, у торца A — южный полюс, а у торца B — северный.

Упражнение 21

1. Магнитная стрелка, расположенная под медным проводником, поворачивается при прохождении по нему электрического тока. Будет ли стрелка поворачиваться, если медный проводник заменить водным раствором щёлочи, помещённым в тонкую стеклянную трубку?

2*. За счёт какой энергии совершается механическая работа по повороту рамки с током, находящейся в постоянном магнитном поле?

3. Как направлены линии магнитной индукции поля, создаваемого прямолинейным проводником с током, изображённые на рисунке 204, a ? В каком направлении проходит электрический ток в проводнике, изображённом на рисунке 204, $б$?

4. Как поведёт себя магнитная стрелка, если рядом с ней расположить прямолинейный проводник с электрическим током (рис. 205)?

5. По круговому витку проходит электрический ток (рис. 206). Как расположится магнитная стрелка, если её поместить в центр витка? Действие магнитного поля Земли не учитывать.

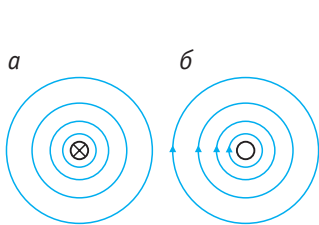


Рис. 204

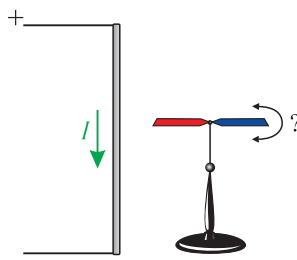


Рис. 205

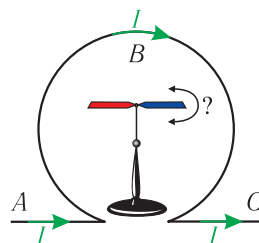


Рис. 206

6. Как будут взаимодействовать две катушки, подвешенные на тонких проводах, если их подключить к источникам тока (рис. 207)?

7. При подключении соленоида к полюсам источника тока он отталкивается от расположенного вблизи постоянного магнита (рис. 208). В каком направлении идёт ток в соленоиде?

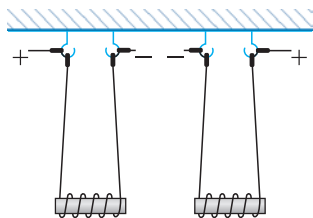


Рис. 207

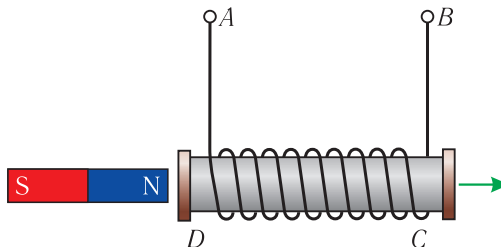


Рис. 208

§ 31. Закон Ампера. Принцип суперпозиции магнитных полей

Для количественного описания магнитного поля необходимо знать не только направление индукции магнитного поля, но и её модуль. Количественно описать магнитное поле можно, как и электростатическое, на основе его источников, т. е. токов. Для обнаружения магнитного поля и определения его характеристик используют «пробный» ток, который представляет собой малый участок проводника (элемент тока). Определив силу, действующую на каждый элемент тока со стороны магнитного поля, можно вычислить силу, действующую на весь проводник.

Модуль индукции магнитного поля. Действие магнитного поля на находящийся в нём малый участок проводника с током экспериментально исследовал Ампер, проводя опыты с различными проводниками, входящими в замкнутые электрические цепи. В 1820 г. Ампер получил формулу для силы, с которой однородное магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током.

Постоянный дугообразный магнит закрепим в вертикальной плоскости так, чтобы линии индукции создаваемого им магнитного поля в пространстве между полюсами располагались вертикально (рис. 209). Магнитное поле магнита,

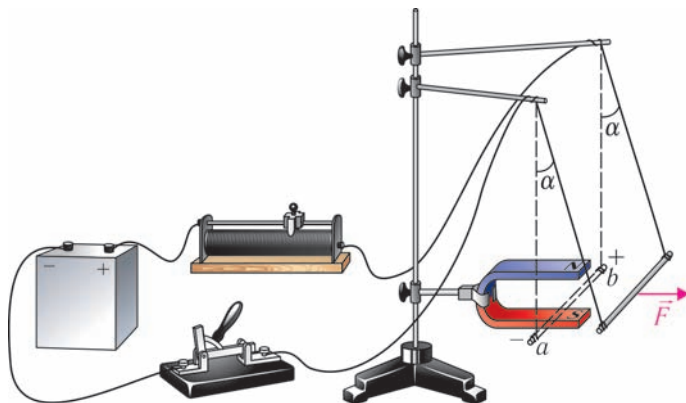


Рис. 209

в основном сосредоточенное между его полюсами, будем считать однородным. Именно в этой области поля находится малый (определяемый размерами области пространства, где магнитное поле практически однородно) участок Δl прямолинейного проводника длиной $l > \Delta l$. Этот проводник подвешен и соединён с источником тока с помощью тонких проводов так, чтобы он располагался перпендикулярно плоскости, в которой находится магнит. Действием слабого магнитного поля на остальные части электрической цепи можно пренебречь.

При замыкании цепи в зависимости от направления электрического тока и расположения полюсов магнита проводник под действием горизонтальной силы $\vec{F}$ начнёт двигаться вправо или влево. При этом подвес отклоняется от вертикального положения на некоторый угол α . Увеличивая силу тока в электрической цепи в 2, 3, 4... раза, можно заметить, что во столько же раз увеличивается и модуль силы F , действующей на проводник (его можно измерить динамометром, отклоняя обесточенный подвес на такой же угол α , или рассчитать по формуле $F = mg \operatorname{tg} \alpha$). Добавляя ещё один такой же и так же расположенный магнит для увеличения размеров области, где магнитное поле достаточно велико и практически однородно, можно добиться увеличения длины $\Delta l'$ прямолинейного участка проводника, находящегося в однородном магнитном поле, $\Delta l' = 2\Delta l < l$. Модуль силы, действующей на проводник, при этом увеличивается в 2 раза. Располагая магнит не в вертикальной плоскости, а под углом к поверхности стола, на котором находится установка, можно изменять угол между направлением линий индукции и проводником. Как показывает опыт, модуль силы, с которой магнитное поле действует на проводник с то-

ком, прямо пропорционален синусу угла между направлениями тока в проводнике и магнитной индукции. Причём модуль силы достигает максимального значения $F_{\max} \sim I\Delta l$, когда участок проводника с током образует угол 90° с направлением индукции магнитного поля ($\sin 90^\circ = 1$), и минимален ($F_{\min} = 0$) в случае расположения проводника параллельно линиям индукции ($\sin 0^\circ = 0$).

Итак, модуль силы, действующей со стороны однородного магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, пропорционален силе тока I , длине этого участка Δl и синусу угла α между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля:

$$F \sim I\Delta l \sin \alpha.$$

Эта сила названа в честь А. М. Ампера *силой Ампера*.

Так как $F_{\max} \sim I\Delta l$, то отношение $\frac{F_{\max}}{I\Delta l}$ для данной области магнитного поля не зависит ни от силы тока I в проводнике, ни от длины Δl прямолинейного участка проводника, полностью находящегося в однородном магнитном поле. Поэтому данное отношение может служить характеристикой той области магнитного поля, в которой находится участок проводника. Это позволяет дать следующее определение индукции магнитного поля.

Индукция магнитного поля — физическая векторная величина, модуль которой равен отношению модуля максимальной силы $F_{\max}$, действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока I и длины Δl этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}. \quad (31.1)$$

Таким образом, в каждой точке магнитного поля может быть определено как направление индукции магнитного поля, так и её модуль.

В СИ индукцию магнитного поля измеряют в теслах (Тл) в честь сербско-го инженера и изобретателя Никола Тесла (1856—1943), с 1884 г. работавшего в США. 1 Тл — индукция такого однородного магнитного поля, которое на прямолинейный участок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует максимальной силой, модуль которой 1 Н:

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}.$$

Сила Ампера. Пусть магнитная индукция составляет угол α с направлением тока в прямолинейном участке проводника длиной Δl (рис. 210). Если весь прямолинейный проводник длиной l находится в однородном магнитном поле, то $\Delta l = l$. Как уже отмечалось, в случае расположения проводника параллель-

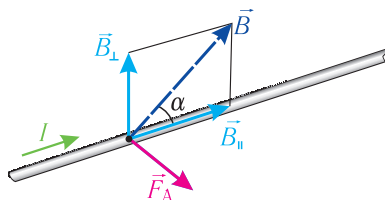


Рис. 210

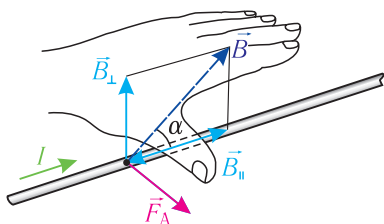


Рис. 211

но линиям индукции магнитное поле не оказывает на проводник никакого воздействия. Поэтому модуль силы Ампера зависит лишь от модуля составляющей магнитной индукции $B_{\perp} = B \sin \alpha$, перпендикулярной проводнику, и не зависит от модуля составляющей $B_{\parallel} = B \cos \alpha$, параллельной проводнику.

Из выражения (31.1) следует, что модуль максимальной силы Ампера

$$F_{\max} = BIl.$$

В общем случае модуль силы Ампера можно рассчитать по формуле

$$F_A = BIl \sin \alpha. \quad (31.2)$$

Выражение (31.2) называют *законом Ампера*.

Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая индукции магнитного поля $\vec{B}_{\perp}$ входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление силы Ампера, действующей на прямолинейный участок проводника с током (рис. 211).



Закон Ампера позволяет объяснить взаимодействие параллельных проводников с током (рис. 212). Ток силой I_1 создаёт магнитное поле индукцией $\vec{B}_1$, действующее

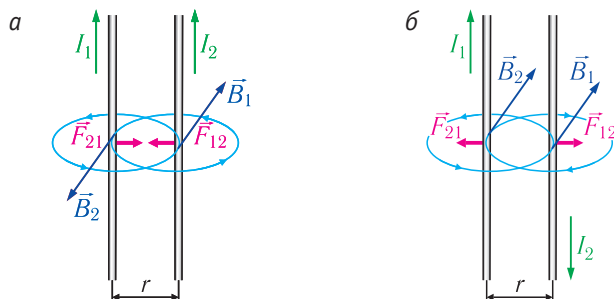


Рис. 212

на проводник с током I_2 силой, модуль которой $F_{12} = B_1 I_2 \Delta l$. Ток I_2 создаёт магнитное поле, индукция которого $\vec{B}_2$. Это поле действует на проводник с током I_1 силой, модуль которой $F_{21} = B_2 I_1 \Delta l$. Силы $\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$ находятся в той же плоскости, что и проводники с током, и являются силами притяжения, если токи направлены в одну сторону (рис. 212, а), и силами отталкивания, если токи направлены в противоположные стороны (рис. 212, б) (проверьте это самостоятельно, используя правило буравчика (или правило правой руки) для определения направлений индукций магнитных полей $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$ и правило левой руки для определения направлений сил Ампера).

Принцип суперпозиции магнитных полей. Когда магнитное поле создаётся несколькими источниками, то индукцию результирующего магнитного поля можно определить по *принципу суперпозиции*: **если магнитное поле в некоторой точке пространства создаётся не одним, а несколькими электрическими токами (или движущимися зарядами), то индукция результирующего магнитного поля в этой точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым током (движущимся зарядом):**

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n. \quad (31.3)$$

Магнитные поля, созданные различными источниками. Для того чтобы рассчитать индукцию результирующего магнитного поля, используя принцип суперпозиции, необходимо уметь определять индукции магнитных полей, созданных различными источниками. Эксперименты показывают, что во всех случаях модуль индукции магнитного поля, созданного током, пропорционален силе тока, зависит от длины и формы проводника с током и расстояния до выбранной точки. Зависимость индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током от расстояния до него экспериментально исследовали французские учёные Жан Батист Био (1774—1862) и Феликс Савар (1791—1841) в 1820 г. Французский учёный Пьер Симон Лаплас (1749—1827), проанализировав экспериментальные данные, полученные Био и Саваром, предложил использовать элемент тока (аналог точечного заряда в электростатике), что позволило сформулировать закон, получивший название закона Био—Савара—Лапласа.

Закон, полученный Био, Саваром и Лапласом, позволяет, в частности, рассчитывать модуль индукции магнитного поля, созданного постоянным током

силой I , проходящим по круговому витку (находящемуся в вакууме или воздухе) радиусом R , в центре этого витка по формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}, \quad (31.4)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}$ — магнитная постоянная.

Модуль индукции магнитного поля, созданного постоянным током силой I , который проходит по бесконечно длинному прямолинейному проводнику (находящемуся в вакууме или воздухе), в точках, расположенных на расстоянии r от оси проводника, определяют по формуле

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \quad (31.5)$$

которая соответствует результатам экспериментов, проведённых Био и Саваром.



Модуль индукции магнитного поля, созданного постоянным током силой I , внутри длинного соленоида, находящегося в вакууме или воздухе, можно определить по формуле

$$B = \mu_0 n I,$$

где $n = \frac{N}{l}$ — число витков на единицу длины соленоида.

Пусть расстояние между тонкими длинными параллельными прямолинейными проводниками с током I (см. рис. 212). Тогда модуль индукции магнитного поля, созданного током силой I_1 первого проводника в тех точках пространства, где находится

второй проводник, $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$. Соответственно модуль индукции магнитного поля тока силой I_2 второго проводника в тех точках пространства, где размещён первый проводник, $B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}$. Поэтому $F_{12} = F_{21} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \Delta l}{2\pi r}$, т. е. силы взаимодействия параллельных проводников с током подчиняются третьему закону Ньютона.

Отметим, что взаимодействие отдельных элементов тока не подчиняется третьему закону Ньютона, потому что магнитные силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ в общем случае не лежат на одной прямой. Однако для сил взаимодействия замкнутых контуров, состоящих из проводников с токами, третий закон Ньютона выполняется, т. е. $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.



1. Индукция магнитного поля — физическая векторная величина, модуль которой равен отношению модуля максимальной силы, действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока и длины этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}.$$

2. 1 Тл — магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое на прямолинейный участок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует максимальной силой, модуль которой 1 Н:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

3. Модуль силы Ампера можно рассчитать по формуле

$$F_A = B l \sin \alpha,$$

где α — угол между направлениями тока и индукции магнитного поля.

4. Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая индукции магнитного поля $\vec{B}_\perp$ входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление силы Ампера, действующей на участок проводника с током.

5. Если магнитное поле в некоторой точке пространства создаётся не одним, а несколькими электрическими токами (или движущимися зарядами), то индукция результирующего магнитного поля в этой точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым током (или движущимся зарядом) (принцип суперпозиции):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

?

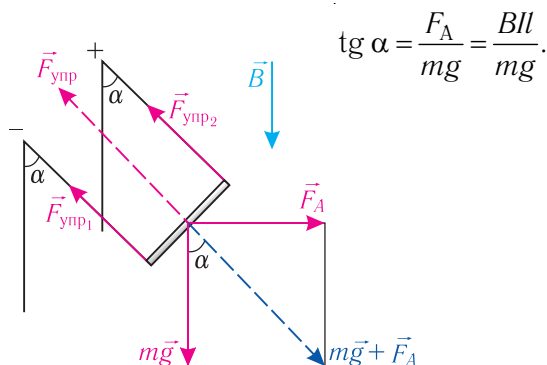
1. Какая физическая величина характеризует магнитное поле в каждой его точке?
2. Как определяют модуль индукции магнитного поля? В каких единицах измеряют индукцию магнитного поля?
3. Как определяют модуль силы Ампера? При каком значении угла между направлениями тока в проводнике и магнитной индукции модуль силы, действующей на проводник с током со стороны магнитного поля, максимален? равен нулю?
4. Как определить направление силы Ампера?
5. В однородном магнитном поле перпендикулярно линиям индукции расположен проводник с током, согнутый под прямым углом. Под каким углом друг к другу направлены силы Ампера, действующие на стороны этого угла?
- 6*. Прямолинейный проводник длиной l , по которому проходит ток силой I , расположен вдоль оси Ox в однородном магнитном поле, индукция $\vec{B}$ которого направлена вдоль оси Oy . Чему равна проекция силы Ампера на ось Ox ?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции магнитных полей.
8. Как определить модуль индукции магнитного поля длинного прямолинейного проводника с током? кругового витка с током?

Примеры решения задач

Пример 1. В однородном магнитном поле, индукция которого направлена вертикально и её модуль $B=0,50$ Тл, на лёгких проводах горизонтально подвешен прямолинейный металлический стержень длиной $l=0,20$ м и массой $m=50$ г. Определите, на какой угол от вертикали отклонятся провода, поддерживающие стержень, если по нему пропустить ток силой $I=5,0$ А. Воздействием магнитного поля на ток в подводящих проводах пренебречь.

Дано:
 $B=0,50$ Тл
 $l=0,20$ м
 $m=50$ г $=0,050$ кг
 $I=5,0$ А
 α — ?

Решение. На стержень действуют силы упругости проводов $\vec{F}_{\text{упр}} = \vec{F}_{\text{упр}_1} + \vec{F}_{\text{упр}_2}$, сила тяжести $m\vec{g}$ и сила Ампера $\vec{F}_A$ (рис. 213). Модуль этой силы определяют по закону Ампера: $F_A = BIl$. При равновесии стержня векторная сумма сил равна нулю: $\vec{F}_{\text{упр}} + m\vec{g} + \vec{F}_A = \vec{0}$. Из рисунка 213 следует:



$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg} = \frac{BIl}{mg}.$$

Рис. 213

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,50 \text{ Тл} \cdot 5,0 \text{ А} \cdot 0,20 \text{ м}}{0,050 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 1,0; \text{ следовательно, } \alpha = 45^\circ.$$

Ответ: $\alpha = 45^\circ$.

Пример 2. По двум одинаковым круговым виткам радиусом $R=6,28$ см каждый, плоскости которых взаимно перпендикулярны, а центры совпадают,

проходят одинаковые токи силой $I = 4,0$ А. Определите модуль индукции магнитного поля в центре витков. Витки находятся в воздухе.

Дано:

$$R = 6,28 \text{ см} = 6,28 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$I_1 = I_2 = I = 4,0 \text{ А}$$

$B = ?$

Решение. Модуль индукции магнитного поля, созданного каждым круговым током в центре соответствующего витка, найдём по формуле (31.4)

$$B_1 = B_2 = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

По правилу буравчика для выбранных направлений токов в витках индукция $\vec{B}_1$ направлена перпендикулярно плоскости рисунка от нас, а индукция $\vec{B}_2$ — вправо (рис. 214). Согласно принципу суперпозиции (31.3) индукция результирующего магнитного поля $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$. Так как индукции магнитных полей взаимно перпендикулярны, по теореме Пифагора находим: $B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = B\sqrt{2}$,

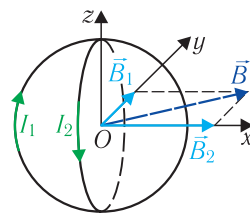


Рис. 214

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

$$B = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \cdot 4,0 \text{ А} \cdot 1,41}{2 \cdot 6,28 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ Тл} = 56 \text{ мкТл}.$$

Ответ: $B = 56$ мкТл.

Упражнение 22

1. Прямолинейный проводник длиной $l = 40$ см, по которому проходит электрический ток силой $I = 8,0$ А, находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,50$ Тл. Определите наибольшее и наименьшее значения модуля силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля.

2. Прямолинейный проводник длиной $l = 1,5$ м находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,20$ Тл. Сила тока в проводнике $I = 3,0$ А. Определите угол между направлениями тока и индукции магнитного поля, если на проводник действует сила Ампера, модуль которой $F_A = 0,64$ Н.

3. Прямолинейный проводник длиной $l = 50$ см, по которому проходит ток силой $I = 2,0$ А, расположен перпендикулярно линиям индукции однородного

магнитного поля (рис. 215). На проводник со стороны магнитного поля действует сила, модуль которой $F=0,40$ Н. Определите модуль и направление индукции магнитного поля.

4. Прямолинейный проводник с площадью поперечного сечения $S=0,10$ см² находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B=0,20$ Тл. При прохождении по проводнику тока силой $I=3,9$ А на него действует максимально возможная для данного магнитного поля сила Ампера. Определите плотность вещества проводника, если модуль силы Ампера равен модулю силы тяжести, действующей на проводник.

5*. Прямолинейный проводник длиной $l=40$ см и массой $m=20$ г расположен горизонтально и перпендикулярно горизонтальным линиям индукции однородного магнитного поля, модуль индукции которого $B=40$ мТл. Определите силу тока, проходящего по проводнику, если он заскользит по проводящим шинам без трения с направленным вертикально вниз ускорением, модуль которого $a=1,0 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

6. Магнитное поле образовано наложением двух однородных магнитных полей, модули индукции которых $B_1=0,03$ Тл и $B_2=0,04$ Тл. Определите модуль индукции результирующего поля, если линии индукции этих полей взаимно перпендикулярны.

7. Магнитное поле, модуль индукции которого $B_1=0,03$ Тл, образовано наложением двух однородных магнитных полей. Определите максимально возможное значение модуля индукции первого поля, если модуль индукции второго поля $B_2=0,02$ Тл.

8. Магнитное поле, модуль индукции которого $B=0,02$ Тл, образовано наложением двух однородных магнитных полей. Определите минимально возможное значение модуля индукции второго поля, если модуль индукции первого поля $B_1=0,05$ Тл.

9*. Длинный прямолинейный проводник с током силой $I=30$ А расположен в воздухе перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля (рис. 216), модуль индукции которого $B=0,20$ мТл. Определите геометрическое место точек, в которых индукция результирующего магнитного поля равна нулю.

10*. По двум бесконечно длинным параллельным прямолинейным проводникам, расположенным на расстоянии $r=50$ см друг от друга, проходят в одном направлении токи силами $I_1=4,0$ А и $I_2=8,0$ А. Определите модуль индукции результирующего магнитного поля в точках, удалённых на расстояние $r_1=40$ см от первого проводника и $r_2=30$ см от второго.

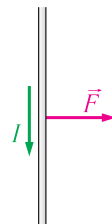


Рис. 215

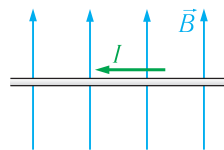


Рис. 216

§ 32. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле

Поскольку электрический ток представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц, то это означает, что магнитное поле, действуя на проводник с током, действует тем самым на каждую из этих движущихся заряженных частиц. Таким образом, силу Ампера, модуль которой $F_A = BI\Delta l \sin \alpha$, можно рассматривать как результат сложения сил, действующих на отдельные движущиеся заряженные частицы. Силу, с которой магнитное поле действует на заряженную частицу, движущуюся в этом поле, называют силой Лоренца в честь выдающегося голландского физика Хендрика Антона Лоренца (1853—1928).

Сила Лоренца. Модуль силы Лоренца можно определить по формуле $F_L = \frac{F_A}{N}$, где N — общее число свободных заряженных частиц на прямолинейном участке проводника длиной Δl (рис. 217). Если модуль заряда одной частицы q , а модуль суммарного заряда всех частиц Nq , то согласно определению силы тока $I = \frac{Nq}{\Delta t}$, где Δt — промежуток времени, за который заряженная частица проходит участок проводника длиной Δl . Тогда

$$F_L = \frac{BI\Delta l \sin \alpha}{N} = \frac{BNq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t N} = \frac{Bq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t}.$$

Поскольку $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ — модуль средней скорости заряженной частицы, упорядоченно движущейся в магнитном поле внутри проводника, то формулу для определения модуля силы Лоренца можно записать в виде

$$F_L = Bqv \sin \alpha, \quad (32.1)$$

где α — угол между направлениями индукции магнитного поля $\vec{B}$ и скорости $\vec{v}$ упорядоченного движения заряженной частицы.

Направление силы Лоренца, действующей на заряженные частицы, как и силы Ампера, определяют по *правилу левой руки*: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной индукции, перпендикулярная скорости упорядоченного движения заряда, входила в ладонь,

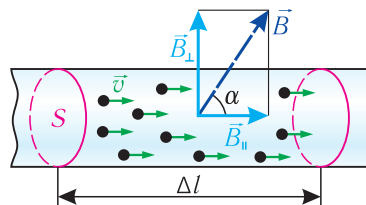


Рис. 217

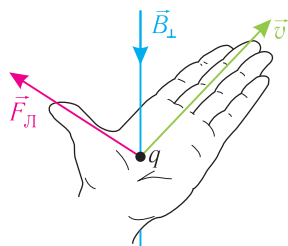


Рис. 218

а четыре пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца (рис. 218).

Отметим, что сила Лоренца зависит от выбора инерциальной системы отсчёта, так как в разных системах отсчёта скорость движения заряда может отличаться.

Движение заряженных частиц в однородном магнитном поле. Под действием силы Лоренца частицы, имеющие электрический заряд, движутся в магнитном поле по криволинейным траекториям. Причём если в данной инерциальной системе отсчёта направление скорости движения частицы перпендикулярно направлению индукции магнитного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$, $\alpha = 90^\circ$), то траекторией движения заряженной частицы в однородном магнитном поле является окружность (рис. 219). Пусть частица массой m и зарядом q движется со скоростью $\vec{v}$, направленной перпендикулярно линиям индукции в однородном магнитном поле, индукция которого $\vec{B}$. Так как сила Лоренца $\vec{F}_L$ перпендикулярна скорости $\vec{v}$ движения частицы (см. рис. 219), то эта сила изменяет только направление скорости, сообщая частице центростремительное ускорение, модуль которого согласно второму закону Ньютона

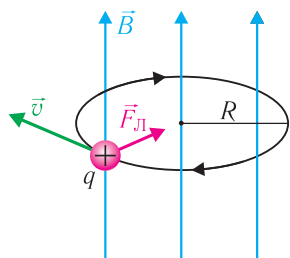


Рис. 219

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{B|q|v}{m}.$$

В результате частица движется по окружности, радиус которой можно определить из формулы $a = \frac{v^2}{R}$:

$$R = \frac{v^2}{a} = \frac{v^2 m}{B|q|v} = \frac{mv}{B|q|}. \quad (32.2)$$

Период T обращения частицы, движущейся по окружности в однородном магнитном поле:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{B|q|} = \frac{2\pi m}{B|q|}. \quad (32.3)$$

Как видно из выражения (32.3), период обращения частицы не зависит от модуля скорости её движения и радиуса траектории, а определяется только параметрами частицы (модулем её заряда и массой) и величиной магнитной индукции. Это используют в циклических ускорителях заряженных частиц — циклотронах.

На частицу, движущуюся вдоль линии индукции магнитного поля, сила Лоренца не действует ($\sin \alpha = 0$).



Если заряженная частица движется в однородном магнитном поле так, что направление её скорости $\vec{v}$ образует с индукцией магнитного поля $\vec{B}$ угол α , причем $\alpha \neq 0$, $\alpha \neq \pi$, то траектория движения частицы представляет собой винтовую линию (рис. 220). При этом радиус R винтовой линии зависит от модуля составляющей скорости $v_{\perp}$, перпендикулярной индукции магнитного поля, а шаг винтовой линии h — от модуля составляющей скорости $v_{\parallel}$, параллельной магнитной индукции. Таким образом, траектория заряженной частицы как бы навивается на линии магнитной индукции.

Подобное явление происходит в магнитном поле Земли, которое является защитой для всего живого от потоков заряженных частиц из космического пространства. Движущиеся с огромными скоростями заряженные частицы из космоса «захватываются» магнитным полем Земли и образуют так называемые радиационные пояса (рис. 221), в которых частицы перемещаются по винтообразным траекториям между северным и южным магнитными полюсами туда и обратно за время порядка долей секунды. Лишь в полярных областях некоторая часть частиц вторгается в верхние слои атмосферы, вызывая полярные сияния (рис. 222).

Поскольку сила Лоренца направлена под углом 90° к скорости движения заряженной частицы в каждой точке траектории (рис. 223), то работа этой силы при

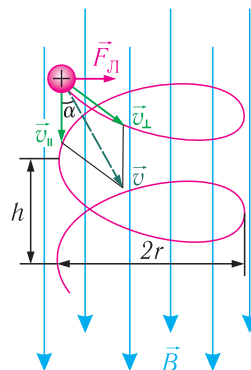


Рис. 220

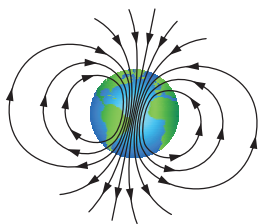


Рис. 221



Рис. 222

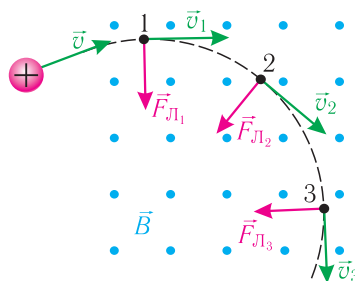


Рис. 223

движении заряженной частицы в магнитном поле равна нулю. Поэтому кинетическая энергия частицы, движущейся в стационарном (не изменяющемся во времени) магнитном поле, не изменяется, т. е. стационарное магнитное поле нельзя использовать для ускорения заряженных частиц. Увеличение кинетической энергии частицы, т. е. её ускорение, возможно под действием электрического поля (в этом случае изменение кинетической энергии частицы равно работе сил поля). Поэтому в современных ускорителях заряженных частиц электрическое поле используют для ускорения, а магнитное — для «формирования» траектории движения заряженных частиц.

Если заряженная частица в момент возникновения внешнего электрического поля покоилась, то $\frac{mv^2}{2} = qU$, где U — напряжение между точками, в которых находилась частица в моменты возникновения внешнего электрического поля и выхода из него, q — модуль заряда частицы. Поэтому модуль скорости частицы при выходе из электрического поля

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \quad (32.4)$$

Если после этого частица попадает в однородное магнитное поле, индукция которого перпендикулярна её скорости, то радиус окружности, по дуге которой будет двигаться частица, $R = \frac{mv}{Bq}$, откуда

$$\frac{q}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}.$$

Величину $\frac{q}{m}$ называют удельным зарядом частицы. Поэтому, если опытным путём определить радиус траектории частицы в магнитном поле, то, зная индукцию магнитного поля и ускоряющее напряжение электрического поля, можно рассчитать удельный заряд частицы. Этот метод используют при конструировании приборов, которые называют масс-спектрометрами.



1. Силу, с которой магнитное поле действует на заряд, движущийся в этом поле, называют силой Лоренца. Модуль силы Лоренца определяют по формуле

$$F_L = B|q|v \sin \alpha.$$

2. Направление силы Лоренца определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая магнитной

индукции, перпендикулярная скорости движения заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительно-го заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец покажет направление действующей на заряд силы Лоренца.

3. Работа силы Лоренца при движении заряженной частицы в не изменяющемся во времени магнитном поле равна нулю.

4. Если в данной инерциальной системе отсчёта скорость движения заряженной частицы перпендикулярна индукции магнитного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$), то траекторией движения частицы в однородном магнитном поле является окружность. Период обращения частицы не зависит от скорости её движения и радиуса траектории, а определяется только модулем её заряда и массой и значением магнитной индукции.

?

1. Как определить модуль силы, действующей со стороны магнитного поля на движущуюся в нём заряженную частицу?

2. Как определяют направление силы Лоренца?

3. Заряженная частица движется в однородном магнитном поле со скоростью, направленной перпендикулярно линиям индукции. По какой траектории движется частица?

4. Почему сила Лоренца изменяет направление скорости движения частицы, но не влияет на её модуль?

5. От чего зависит период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле?

6. На рисунке 224 показаны направления скорости движения частицы, модуль заряда которой q , и силы Лоренца, действующей на частицу со стороны магнитного поля, индукция которого направлена перпендикулярно плоскости рисунка на наблюдателя. Определите знак заряда частицы.

7*. На рисунке 225 показаны траектории движения двух частиц, имеющих одинаковые заряды. Частицы влетают в однородное магнитное поле из одной точки A с одинаковыми скоростями. Определите знак заряда частиц. Объясните причину несовпадения траекторий их движения.

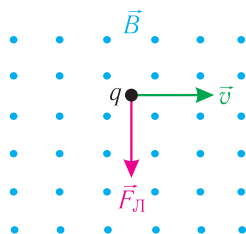


Рис. 224

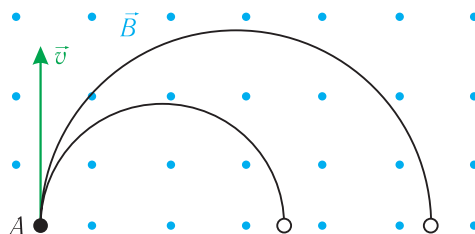


Рис. 225

Примеры решения задач

Пример 1. Электрон движется в однородном магнитном поле по окружности радиусом $R = 12$ см со скоростью, модуль которой значительно меньше модуля скорости света. Определите модуль импульса электрона, если модуль индукции магнитного поля $B = 0,020$ Тл.

Дано:
 $R = 12$ см $= 0,12$ м
 $B = 0,020$ Тл
 $p = ?$

Решение. Модуль импульса электрона $p = mv$, где m — масса электрона, v — модуль скорости его движения. На электрон в магнитном поле действуют сила Лоренца и сила тяжести, модуль которой во много раз меньше модуля силы Лоренца. Поэтому действием силы тяжести на движущуюся в магнитном поле заряженную частицу можно пренебречь. Согласно второму закону Ньютона $\frac{mv^2}{R} = Bev$, откуда $v = \frac{BeR}{m}$, где $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — модуль заряда электрона. Следовательно,
 $p = m \frac{BeR}{m} = BeR.$

$$p = 0,020 \text{ Тл} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,12 \text{ м} = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{Кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Ответ: } p = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{Кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

Пример 2. Электрон, ускоренный из состояния покоя в электростатическом поле разностью потенциалов $U = 270$ В, движется параллельно тонкому длинному прямолинейному проводнику, находящемуся в вакууме, на расстоянии $r = 5,0$ мм от него. Определите модуль силы, которая начнёт действовать на электрон, если по проводнику пустить электрический ток силой $I = 10$ А, а также радиус кривизны его траектории в начале искривлённого участка. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дано:
 $U = 270$ В
 $r = 5,0$ мм $= 5,0 \cdot 10^{-3}$ м
 $I = 10$ А
 $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
 $F_L = ?$
 $R = ?$

Решение. При разгоне электрона $eU = \frac{m_e v^2}{2}$. Отсюда модуль скорости, до которой разогнали электрон, $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$, где e — модуль заряда электрона. Равномерное прямолинейное движение электрона параллельно тонкому длинному прямолинейному проводнику сменилось равномерным криволиней-

ным, как только по проводнику начал проходить электрический ток и на электрон действовала сила Лоренца, модуль которой $F_L = Bev$.

Модуль индукции магнитного поля, образованного тонким длинным прямолинейным проводником с током, $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$.

$$\text{Тогда } F_L = e \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}.$$

$$F_L = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \cdot \frac{10 \text{ А}}{2 \cdot 3,14 \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}} \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 270 \text{ В}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 6,2 \cdot 10^{-16} \text{ Н}.$$

Как только появляется магнитное поле, создаваемое проводником с током, электрон продолжает двигаться, но уже с центростремительным ускорением:

$$\vec{F}_L = m_e \vec{a}. \text{ Тогда } F_L = m_e \frac{v^2}{R}, \text{ откуда } R = \frac{m_e v^2}{F_L} = \frac{2eU}{F_L}.$$

$$R = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 270 \text{ В}}{6,2 \cdot 10^{-16} \text{ Н}} = 0,14 \text{ м}.$$

Ответ: $F_L = 6,2 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$, $R = 0,14 \text{ м}$.

Упражнение 23

1. Электрон движется со скоростью, модуль которой $v = 2,0 \cdot 10^8 \frac{\text{см}}{\text{с}}$, перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля, модуль индукции которого $B = 1,6 \text{ мТл}$. Определите модуль силы, действующей на электрон в магнитном поле.

2. Электрон движется в однородном магнитном поле по окружности, радиус которой $R = 8,0 \text{ мм}$. Определите модуль индукции магнитного поля, если модуль скорости движения электрона $v = 4,0 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

3. Пылинка с зарядом $q = 1,6 \text{ нКл}$ и массой $m = 0,80 \text{ мг}$ движется в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 1,0 \text{ Тл}$, перпендикулярно линиям индукции. Определите период обращения пылинки.

4. Электрон движется в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 2,0 \text{ мТл}$, по окружности радиусом $R = 2,0 \text{ см}$. Определите кинетическую энергию электрона. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.

5. Определите, какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти из состояния покоя электрон, чтобы в однородном магнитном поле с модулем индукции $B = 50$ мТл на него действовала сила Лоренца, модуль которой $F_L = 8,0 \cdot 10^{-14}$ Н. В магнитное поле электрон влетает перпендикулярно линиям индукции. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

6*. Заряженная частица движется в пространстве со взаимно перпендикулярными однородными электрическим и магнитным полями. Модули напряжённости электрического поля и индукции магнитного соответственно $E = 0,24 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ и $B = 0,04$ Тл. Определите модуль скорости равномерного движения заряженной частицы. Действием силы тяжести на частицу пренебречь.

§ 33. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца

После опытов Эрстеда и Ампера стало понятно, что электрические и магнитные поля имеют одни и те же источники — движущиеся электрические заряды. Это позволило предположить, что они каким-то образом связаны друг с другом. Фарадей был абсолютно уверен в единстве электрических и магнитных явлений. Вскоре после открытия Эрстеда в своём дневнике в декабре 1821 г. он записал: «Превратить магнетизм в электричество». На решение этой фундаментальной задачи ему понадобилось десять лет. После многочисленных экспериментов Фарадей сделал эпохальное открытие: замыкая и размыкая электрическую цепь одной катушки, он в замкнутой цепи другой катушки получил электрический ток. Наблюдаемое явление Фарадей назвал электромагнитной индукцией.

Магнитный поток. Индукция магнитного поля характеризует магнитное поле в конкретной точке пространства. Чтобы охарактеризовать магнитное поле во всех точках поверхности, ограниченной замкнутым контуром, вводят физическую величину, которую называют магнитным потоком (потоком магнитной индукции).

Магнитным потоком Φ через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, называют физическую скалярную величину, равную произведению модуля индукции B магнитного поля, площади S поверхности

и косинуса угла α между направлениями нормали к этой поверхности и магнитной индукции (рис. 226):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (33.1)$$

За единицу магнитного потока в СИ принят вебер (Вб). 1 Вб — магнитный поток однородного магнитного поля индукцией 1 Тл через плоскую поверхность площадью 1 м², расположенную перпендикулярно индукции магнитного поля.

Из формулы (33.1) видно, что магнитный поток зависит от взаимной ориентации линий магнитной индукции и нормали к плоской поверхности. Поток максимален, если $\alpha = 0$, т. е. если поверхность перпендикулярна линиям индукции магнитного поля:

$$\Phi_{\max} = BS.$$

Если плоская поверхность параллельна линиям индукции ($\alpha = 90^\circ$), то поток через неё равен нулю.

На практике часто встречаются ситуации, когда линии магнитной индукции пересекают поверхности, ограниченные не одним контуром, а несколькими. Так, например, линии магнитной индукции могут пересекать поверхности, ограниченные витками соленоида, которые «параллельны» друг другу и имеют одинаковую площадь поверхности. В этом случае магнитный поток определяют по формуле

$$\Phi = NBS,$$

где N — число витков соленоида, S — площадь поверхности, ограниченной каждым витком.

Изменить магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, можно, изменяя: 1) индукцию магнитного поля, в котором находится контур; 2) размеры этого контура; 3) ориентацию контура в магнитном поле.

Явление электромагнитной индукции. В 1831 г. Фарадей провёл серию опытов, которые позволили установить следующие факты:

— при движении постоянного магнита относительно катушки, подключённой к гальванометру, в катушке возникал электрический ток (стрелка гальванометра отклонялась). Причём направление тока изменялось на противоположное при изменении направления движения магнита. Это же явление наблюдалось, если магнит был неподвижен, а двигали катушку (рис. 227);

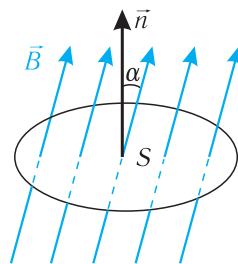


Рис. 226

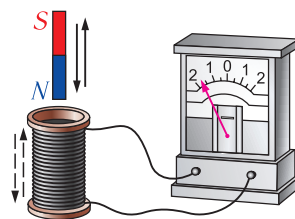


Рис. 227

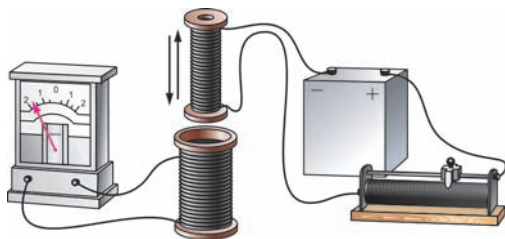


Рис. 228

— в катушке, подключённой к гальванометру, возникал электрический ток, если относительно неё двигали другую катушку, которая была подключена к источнику постоянного тока (рис. 228);

— если две катушки намотаны на общий каркас и одну подключали к гальванометру, а другую — к источнику тока, то ток в первой катушке

возникал при изменении тока во второй (рис. 229).

Во всех рассмотренных случаях электрический ток в цепи гальванометра возникал только при изменении магнитного потока через поверхности, ограниченные витками катушки, подключённой к гальванометру (рис. 230). Причём значение силы тока, возникающего в контуре, не зависело от способа изменения магнитного потока, а определялось только скоростью его изменения.

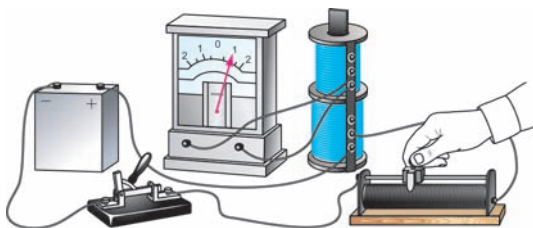


Рис. 229

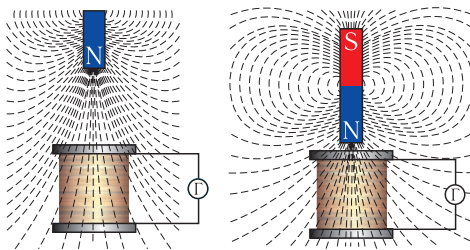


Рис. 230

Электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, называют *индукционным током*.

Как вы уже знаете, для существования тока в замкнутой электрической цепи необходимо, чтобы на свободные заряженные частицы действовали сторонние силы, т. е. в цепи должен быть источник ЭДС. Очевидно, что в опытах Фарадея источником этих сторонних сил являлся изменяющийся магнитный поток, который создавал в цепи ЭДС. Эту ЭДС называют *электродвижущей силой индукции* или *ЭДС индукции*. Если цепь замкнута, ЭДС индукции создаёт индукционный ток, т. е. возникновение индукционного тока является вторичным эффектом.

Явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоится в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется, называют электромагнитной индукцией.

Направление индукционного тока. Опыты Фарадея показали, что направление индукционного тока, вызванного возрастанием магнитного потока, было противоположно направлению индукционного тока, вызванного его уменьшением. Исследовав явление электромагнитной индукции, петербургский академик Эмилий Христианович Ленц (1804—1865) в 1833 г. сформулировал правило для определения направления индукционного тока. Согласно этому правилу **возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, которым вызывается этот индукционный ток.** Это означает, что при возрастании магнитного потока магнитное поле индукционного тока направлено против внешнего поля, а при убывании — магнитное поле индукционного тока направлено так же, как и внешнее поле.

В более сжатой форме правило Ленца можно сформулировать следующим образом: индукционный ток всегда направлен так, что его действие противоположно действию причины, вызвавшей этот ток.

Правило Ленца можно проиллюстрировать, используя два алюминиевых кольца (одно из них с разрезом), закреплённых на стержне, свободно вращающемся вокруг вертикальной оси (рис. 231). Опыт показывает, что при приближении постоянного магнита к сплошному кольцу оно отталкивается от магнита; при удалении магнита кольцо притягивается к нему. Отталкивание и притяжение сплошного кольца объясняют возникновением в нём индукционного тока при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную кольцом. Очевидно, что при приближении магнита к кольцу направление индукционного тока таково, что индукция магнитного поля тока противоположна индукции магнитного поля постоянного магнита (рис. 232). При удалении

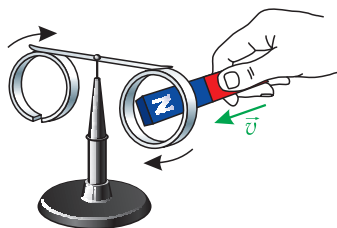


Рис. 231

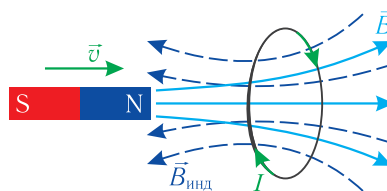


Рис. 232

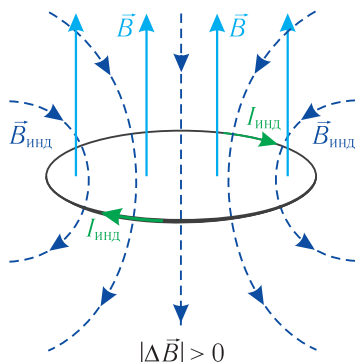


Рис. 233

магнита индукции магнитных полей тока и магнита совпадают по направлению. При движении магнита относительно кольца с разрезом взаимодействие не наблюдается, так как индукционный ток отсутствует.

Чтобы определить направление индукционного тока по правилу Ленца, необходимо выполнить следующие операции:

- 1) определить направление линий индукции внешнего магнитного поля $\vec{B}$;
- 2) выяснить, увеличивается или уменьшается магнитный поток через поверхность, ограниченную проводящим контуром;
- 3) определить направление линий индукции магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$: если изменение магнитного потока $\Delta\Phi < 0$, то направления индукций внешнего магнитного поля $\vec{B}$ и магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$ совпадают, если $\Delta\Phi > 0$, то направления противоположны;
- 4) зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$ по правилу буравчика (правилу часовой стрелки) определить направление индукционного тока (рис. 233).

Правило Ленца соответствует закону сохранения энергии применительно к явлению электромагнитной индукции. В самом деле, если бы индукционный ток имел другое направление, он мог бы существовать без затрат энергии, что противоречит закону сохранения энергии.

Открытие явления электромагнитной индукции имело большое значение. Была доказана взаимосвязь магнитных и электрических явлений, что послужило в дальнейшем отправным пунктом для разработки теории электромагнитного поля.



1. Магнитным потоком через плоскую поверхность называют физическую скалярную величину, равную произведению модуля индукции однородного магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями магнитной индукции и нормали к этой поверхности:

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

2. Явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоится в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в

постоянном магнитном поле так, что число линий магнитной индукции, пронизывающих контур, меняется, называют электромагнитной индукцией.

3. Электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром, называют индукционным током.

4. Возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, что созданный им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, которым вызывается этот индукционный ток (правило Ленца).

?

1. Что называют магнитным потоком? Что является единицей магнитного потока в СИ?

2. Какими способами можно изменить магнитный поток через поверхность?

3. При каких условиях в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток?

4. В чём заключается явление электромагнитной индукции?

5. Как формулируют правило Ленца?

6. Как объяснить результаты опытов со сплошным алюминиевым кольцом и движущимся постоянным магнитом?

7. Как определяют направление индукционного тока?

8*. В каком случае в замкнутом проводящем прямоугольном контуре, находящемся в однородном магнитном поле, индуцируется электрический ток: а) контур движется поступательно; б) контур вращается вокруг оси, проходящей через одну из сторон? Почему?

9*. Почему при замыкании цепи катушки алюминиевое кольцо, надетое на сердечник, состоящий из железных стержней, вставленных в катушку (рис. 234), поднимается вверх?

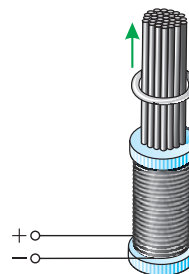


Рис. 234

§ 34. Закон электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле

Открыв явление электромагнитной индукции, Фарадей практически за полтора месяца установил все существенные закономерности этого явления. Ему стала понятна сущность явления, которое сыграло такую важную роль для человечества: во всех экспериментах, проведённых им, индукционный ток в проводящем контуре возникал в результате изменения магнитного потока через поверхность,

ограниченную этим контуром. Фарадей не только открыл явление электромагнитной индукции, но и первым продемонстрировал, «что можно создать постоянный ток электричества при помощи обыкновенных магнитов», сконструировав униполярный генератор электрического тока, превращающий механическую энергию в электрическую.

Закон электромагнитной индукции. Анализируя результаты опытов Фарадея, Максвелл в 1873 г. пришёл к выводу, что ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, т. е.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (34.1)$$

Чтобы обеспечить строгое равенство в выражении (34.1), необходимо учесть направление индукционного тока. Согласно правилу Ленца при увеличении магнитного потока $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ ЭДС индукции отрицательная ($\mathcal{E}_{\text{инд}} < 0$) и, наоборот, при уменьшении магнитного потока $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ ЭДС индукции положительная ($\mathcal{E}_{\text{инд}} > 0$). Тогда

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (34.2)$$

Таким образом, **ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком.**

Выражение (34.2) называют *законом электромагнитной индукции Фарадея*, подчёркивая этим заслуги учёного в изучении указанного явления. Следует отметить, что данный закон является универсальным, т. е. ЭДС индукции не зависит от способа изменения магнитного потока.

Согласно закону Ома для полной цепи

$$I_{\text{инд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R},$$

где R — сопротивление проводника, из которого изготовлен замкнутый проводящий контур.

Вихревое электрическое поле. Итак, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную проводящим контуром, в замкнутом неподвижном (относительно выбранной инерциальной системы отсчёта) контуре возникает электрический ток. Это свидетельствует о том, что на свободные

заряженные частицы в контуре действуют силы. Но для хаотически движущихся заряженных частиц усреднённое значение силы Лоренца равно нулю, поэтому на такие частицы действие оказывает электрическое поле. Таким образом, при любом изменении магнитного поля в окружающем пространстве возникает электрическое поле. Именно это индукционное электрическое поле действует на заряженные частицы, приводя их в упорядоченное движение и создавая индукционный электрический ток. Подчеркнём, что индукционное электрическое поле не связано с электрическими зарядами, его источником является изменяющееся со временем магнитное поле. Линии напряжённости индукционного электрического поля замкнуты.

Электрическое поле, возникающее при любом изменении магнитного поля, называют *вихревым электрическим полем*.

Вихревой, т. е. непотенциальный, характер индукционного электрического поля является причиной того, что при перемещении заряда по замкнутой цепи силами этого поля совершается работа, не равная нулю.

Таким образом, ЭДС индукции, которая возникает в неподвижном замкнутом контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле, равна работе сил вихревого электрического поля по перемещению вдоль этого контура единичного положительного заряда. Если такой контур оказывается проводящим, то возникшая в нём ЭДС индукции приводит к появлению индукционного тока.

Максвелл в 1873 г. установил, что ЭДС индукции, возникающая в неподвижном контуре при изменении магнитного поля, не зависит от характеристик этого контура (вещества, вида свободных носителей заряда, сопротивления, температуры и др.). На основании этого он сделал вывод, что роль контура сводится только к индикации вихревого электрического поля, создаваемого переменным магнитным полем.

Итак, сущность явления электромагнитной индукции заключается в том, что вихревое электрическое поле возникает в любой точке пространства, если в этой точке существует изменяющееся магнитное поле, независимо от того, есть там проводящий контур или нет.



Линии напряжённости вихревого электрического поля охватывают линии индукции изменяющегося магнитного поля. Направление линий напряжённости вихревого электрического поля определяется по правилу Ленца. Действительно, если поместить в изменяющееся магнитное поле замкнутый проводящий контур, то по нему в направлении линий напряжённости электрического поля пойдёт индукционный электрический ток.

Этот ток создаёт индукционное магнитное поле, индукция которого $\vec{B}_{\text{инд}}$ показана на рисунке 235 штриховыми линиями. Она направлена так, что индукционное магнит-

ное поле противодействует изменению основного магнитного поля (правило Ленца): если модуль индукции основного поля возрастает, то $\vec{B}_{\text{инд}}$ противоположна индукции основного поля $\vec{B}$ (рис. 235, а); если модуль индукции основного поля уменьшается, то $\vec{B}_{\text{инд}}$ и $\vec{B}$ имеют одинаковое направление (рис. 235, б).

ЭДС индукции возникает не только в контуре, находящемся в состоянии покоя относительно определённой инерциальной системы отсчёта, при изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, но и при движении проводника в постоянном магнитном поле. ЭДС индукции, возникающая в прямолинейном проводнике, поступательно движущемся в однородном магнитном поле, прямо пропорциональна модулю индукции магнитного поля B , длине активной части проводника l (части, которая находится в магнитном поле), модулю поперечной скорости движения проводника $v_{\perp}$ и синусу угла α между направлениями магнитной индукции поля $\vec{B}$ и поперечной скорости движения проводника $\vec{v}_{\perp}$: $\mathcal{E}_{\text{инд}} = Blv_{\perp} \sin \alpha$.

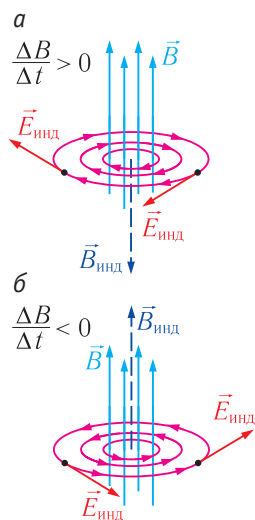


Рис. 235



1. ЭДС индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком (закон электромагнитной индукции Фарадея):

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

2. Электрическое поле, возникающее при любом изменении магнитного поля, называют вихревым электрическим полем.

3. Вихревое электрическое поле возникает в любой точке пространства, если в этой точке существует изменяющееся со временем магнитное поле, независимо от того, есть там проводящий контур или нет.



1. Опишите опыты, в которых обнаруживают явление электромагнитной индукции.
2. Как формулируют закон электромагнитной индукции?
3. Почему в формуле, являющейся математическим выражением закона электромагнитной индукции, стоит знак «минус»?
4. Что изменилось бы в опытах Фарадея, если бы он использовал катушки с большим количеством витков?

5. Отличается ли индуцированный электрический ток в проводнике от электрического тока, создаваемого любым другим источником, например, гальваническим элементом?
6. Какова природа сторонних сил, вызывающих появление индукционного тока в неподвижном проводящем контуре, находящемся в изменяющемся магнитном поле?
7. В чём отличие электростатического поля от вихревого электрического поля?
- 8*. От чего зависит ЭДС индукции, возникающая в прямолинейном проводнике, который поступательно движется в неизменяющемся со временем магнитном поле?

Пример решения задачи

Определите направление индукционного тока в соленоиде, изображённом на рисунке 236.

Решение. При приближении северного полюса магнита к соленоиду в нём индуцируется электрический ток такого направления, что ближайший к магниту конец соленоида приобретает свойства северного магнитного полюса. Определяя направление тока по правилу буравчика (правилу часовой стрелки), видим, что ток в соленоиде идёт в направлении от точки A к точке B . При удалении северного полюса магнита от соленоида в нём возникает индукционный ток, направленный от точки B к точке A .

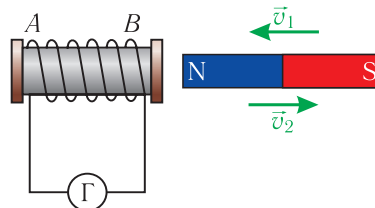


Рис. 236

Упражнение 24

1. Круговой контур радиусом $r = 12$ см находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,40$ Тл. Определите магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, если: а) линии магнитной индукции параллельны нормали к этой поверхности; б) поверхность, ограниченная контуром, параллельна линиям магнитной индукции; в) линии магнитной индукции образуют угол $\alpha = 30^\circ$ с этой поверхностью.

2. Ось соленоида, состоящего из $N = 100$ витков, параллельна линиям индукции однородного магнитного поля, модуль индукции которого $B = 0,20$ Тл. Определите магнитный поток через поверхности, ограниченные всеми витками соленоида, если площадь каждой из них $S = 16$ см².

3. Определите промежуток времени, в течение которого магнитный поток через поверхность, ограниченную замкнутым проводником, равномерно уменьшился на $\Delta\Phi = -0,20$ Вб, если индуцированная в проводнике ЭДС $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 0,80$ В.

4. Определите магнитный поток через поверхность, ограниченную витком соленоида, который состоит из $N = 100$ витков, если при равномерном уменьшении до нуля модуля индукции однородного магнитного поля в соленоиде в течение промежутка времени $\Delta t = 5,0$ с индуцируется ЭДС $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 20$ В.

5. Ось соленоида составляет с индукцией однородного магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$. Площадь поверхности, ограниченной каждым из $N = 100$ витков соленоида, $S_1 = 12 \text{ см}^2$. Определите, какая ЭДС индуцируется в соленоиде при равномерном изменении модуля индукции магнитного поля со скоростью

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = 18 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}.$$

6. Проводящий контур с площадью ограниченной им поверхности $S = 0,16 \text{ м}^2$ и сопротивлением $R = 5,0 \text{ МОм}$ находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого ежесекундно увеличивается на $\Delta B = 0,50 \text{ мТл}$. Определите количество теплоты, выделяющееся в контуре за промежуток времени $t = 1,0 \text{ ч}$.

7*. В однородном магнитном поле с модулем индукции $B = 80 \text{ мТл}$ вращается стержень длиной $l = 1,0 \text{ м}$ с постоянной угловой скоростью, модуль которой $\omega = 10 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Ось вращения проходит через один из концов стержня параллельно линиям магнитной индукции. Определите ЭДС индукции, возникающую в стержне.

8*. Круговой виток диаметром $D = 20 \text{ см}$ из медного провода, площадь поперечного сечения которого $S = 1,2 \text{ мм}^2$, расположен в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 40 \text{ мТл}$, перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите, какой заряд пройдёт по витку, если: а) направление индукции поля изменить на противоположное; б) виток вытянуть в сложенный вдвое отрезок прямой. Удельное сопротивление меди $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

9*. Определите направление индукционного тока в катушке CD (рис. 237) в случаях: а) замыкания цепи; б) размыкания цепи; в) перемещения ползунка реостата вправо при замкнутой цепи; г) перемещения ползунка реостата влево при замкнутой цепи.

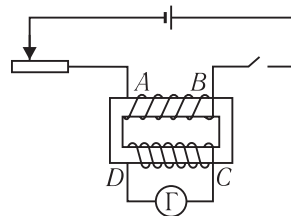


Рис. 237

§ 35. Явление самоиндукции. Индуктивность.

Энергия магнитного поля катушки с током

Электромагнитная индукция проявляется во всех случаях изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Современник Фарадея американский физик Джозеф Генри (1797—1878) независимо от своего английского коллеги открыл некоторые из элек-

тромагнитных эффектов. В 1829 г. Генри обнаружил, что ЭДС индукции возникает в неподвижном контуре и в отсутствие изменения внешнего магнитного поля. Оказалось, что изменяющийся электрический ток, проходящий в контуре, создаёт изменяющийся магнитный поток. Это явление было названо самоиндукцией.

Самоиндукция. Самоиндукция является важным частным случаем явления электромагнитной индукции. Если электрический ток в замкнутом проводящем контуре по каким-либо причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле этого тока ($B \sim I$). Но при изменении индукции магнитного поля, создаваемого током, проходящим в контуре, изменяется и магнитный поток ($\Phi \sim B$). Следовательно, магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, пропорционален силе тока в контуре:

$$\Phi \sim B \sim I.$$

Коэффициент пропорциональности между магнитным потоком Φ и силой тока I Томсон (лорд Кельвин) в 1853 г. предложил назвать «коэффициент самоиндукции»:

$$\Phi = LI. \quad (35.1)$$

Коэффициент самоиндукции L часто называют *индуктивностью* контура.

Индуктивность в СИ измеряют в генри (Гн). Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе тока в контуре 1 А магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, равен 1 Вб.

Индуктивность зависит от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств среды, в которой находится этот контур.



Например, индуктивность однослойного соленоида $L = \mu_0 \mu n^2 S l$, где n — число витков на единицу длины соленоида, S — площадь поверхности, ограниченной витком, l — длина соленоида, μ — магнитная проницаемость среды. Увеличить магнитную проницаемость среды можно введением в соленоид ферромагнитного сердечника.

Из формулы (35.1) следует, что изменить магнитный поток можно, изменяя силу тока в контуре, или его индуктивность, или то и другое одновременно. Согласно закону электромагнитной индукции изменяющийся магнитный поток создаёт в контуре ЭДС, которую в этом случае называют *электродвижущей силой самоиндукции* или *ЭДС самоиндукции*:

$$\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

Если индуктивность контура не изменяется во времени, т. е. $L = \text{const}$, то

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Поскольку контур замкнут, ЭДС самоиндукции создаёт в нём ток самоиндукции, силу которого определяют по закону Ома $I_c = \frac{\mathcal{E}_c}{R}$, где R — сопротивление контура. Согласно правилу Ленца ток самоиндукции всегда направлен так, что он противодействует изменению тока, создаваемого источником. При возрастании силы тока ток самоиндукции направлен против тока источника, а при уменьшении — направления тока источника и тока самоиндукции совпадают.

Наблюдение самоиндукции. Для наблюдения явления самоиндукции соберём электрическую цепь, состоящую из катушки с большой индуктивностью, резистора с электрическим сопротивлением, равным сопротивлению обмотки катушки, двух одинаковых лампочек, ключа и источника постоянного тока (рис. 238). При замыкании цепи лампочка $\mathcal{L}_2$ начинает светиться практически сразу, а лампочка $\mathcal{L}_1$ — с заметным запаздыванием. При

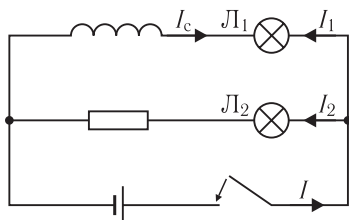


Рис. 238

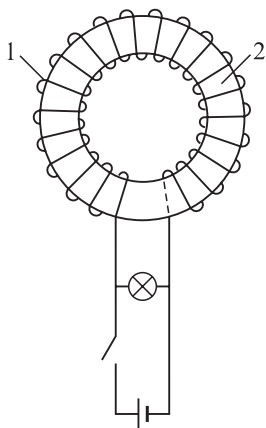


Рис. 239

возрастании силы тока I_1 , созданного источником, на участке, образованном катушкой и лампочкой $\mathcal{L}_1$, ЭДС самоиндукции в катушке имеет такую полярность, что создаваемый ею ток самоиндукции I_c направлен навстречу току источника. В результате рост силы тока на этом участке цепи замедляется, и сила тока $I_1 - |I_c|$ не сразу достигает своего максимального значения.

Явление самоиндукции можно наблюдать и при размыкании электрической цепи. Соберём цепь, состоящую из катушки I с большим количеством витков, намотанных на железном сердечнике 2, к зажимам которой подключена лампочка с большим электрическим сопротивлением по сравнению с сопротивлением обмотки катушки (рис. 239). В качестве источника тока возьмём источник, ЭДС которого 2 В. Лампочка подключена параллельно катушке. При размыкании ключа сохраняется замкнутой часть цепи, состоящая из уже последовательно соединённых катушки и лампочки.

Пока ключ замкнут, лампочка будет тускло светиться, так как отношение сил токов, проходящих через лампочку и катушку, обратно отношению их со-

противлений $\frac{I_{\text{л}}}{I_{\text{к}}} = \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{л}}}$. Однако при размыкании ключа можно увидеть, что лампочка ярко вспыхивает. Почему это происходит? При размыкании цепи сила тока в катушке убывает, что приводит к возникновению ЭДС самоиндукции. Возникающий в цепи ток самоиндукции, согласно правилу Ленца, совпадает по направлению с током катушки, не позволяя ему резко уменьшать силу тока. Это и обеспечивает вспышку лампочки. Заметим, что явление самоиндукции имеет место в любых случаях изменения силы тока в цепи, содержащей индуктивность, или изменения самой индуктивности.

Энергия магнитного поля. Откуда берётся энергия, обеспечивающая вспышку лампочки? Это не энергия источника тока, так как он уже отсоединён. Вспышка лампочки происходит одновременно с уменьшением силы тока в катушке и создаваемого током магнитного поля. Можно предположить, что запасённая в катушке в процессе самоиндукции энергия магнитного поля превращается во внутреннюю энергию спирали лампочки и энергию её излучения.

В самом деле, при замыкании цепи, состоящей из источника тока с ЭДС $\mathcal{E}_0$, катушки индуктивностью L и резистора сопротивлением R , сила тока I в цепи начнёт возрастать и появится ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{\text{с}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Тогда в соответствии с законом Ома сила тока в цепи $I = \frac{\mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_{\text{с}}}{R}$. Значит,

$$\mathcal{E}_0 = IR + L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Умножив полученное равенство на $I\Delta t$, где Δt — достаточно малый промежуток времени, в течение которого сила тока остаётся практически постоянной, найдём элементарную работу, совершаемую сторонними силами в источнике тока:

$$\mathcal{E}_0 I \Delta t = I^2 R \Delta t + LI \Delta I.$$

В процессе установления тока, когда сила тока I и магнитный поток $\Phi = LI$ возрастают, работа, совершаемая сторонними силами в источнике тока, превышает выделяющееся на резисторе количество теплоты. Элементарная дополнительная работа, совершаемая сторонними силами за промежуток времени Δt при преодолении ЭДС самоиндукции в процессе установления тока (рис. 240):

$$\delta A_{\text{доп}} = \Phi \Delta I.$$

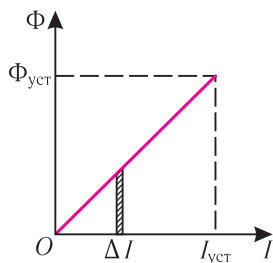


Рис. 240

Полная дополнительная работа $A_{\text{доп}}$, равная сумме элементарных дополнительных работ $\delta A_{\text{доп}}$ в процессе установления тока, равна сумме площадей всех аналогичных столбиков, т. е. площади фигуры под графиком зависимости $\Phi = \Phi(I)$ (рис. 240):

$$A_{\text{доп}} = \frac{\Phi_{\text{уст}} I_{\text{уст}}}{2} = \frac{LI_{\text{уст}}^2}{2}.$$

Эта работа превращается в энергию магнитного поля катушки, поэтому

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}.$$



1. Явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи называют самоиндукцией.

2. ЭДС самоиндукции равна произведению индуктивности контура (катушки) и скорости изменения силы тока в нём, взятому с противоположным знаком:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

3. Индуктивность контура равна 1 Гн, если при силе тока в контуре 1 А магнитный поток через поверхность, ограниченную этим контуром, равен 1 Вб.

4. Энергия магнитного поля катушки с током прямо пропорциональна квадрату силы тока:

$$W_{\text{м}} = \frac{LI^2}{2}.$$



1. Что называют самоиндукцией?
2. В каких опытах можно наблюдать явление самоиндукции?
3. От чего зависит ЭДС самоиндукции?
4. Что называют индуктивностью? В каких единицах СИ её измеряют?
5. Почему для создания электрического тока в цепи с катушкой индуктивности источник должен затратить энергию?
6. Как вычислить энергию магнитного поля катушки с током?

Пример решения задачи

За промежуток времени $\Delta t = 9,50$ мс сила тока в катушке индуктивности равномерно возросла от $I_1 = 1,60$ А до $I_2 = 2,40$ А. При этом в катушке возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -14,0$ В. Определите собственный магнитный поток в конце процесса нарастания тока и приращение энергии магнитного поля катушки.

Дано:

$$\Delta t = 9,50 \text{ мс} = 9,50 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

$$I_1 = 1,60 \text{ А}$$

$$I_2 = 2,40 \text{ А}$$

$$\mathcal{E}_c = -14,0 \text{ В}$$

$$\Phi_c \text{ — ? } \Delta W_M \text{ — ?}$$

Решение. При изменении в катушке силы тока от I_1 до I_2 возникает собственный магнитный поток, $\Phi_c = LI_2$. Индуктивность L катушки можно определить из закона электромагнитной индукции

$$\text{для явления самоиндукции: } \mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{I_2 - I_1}{\Delta t}.$$

$$\text{Следовательно, } L = -\frac{\mathcal{E}_c \Delta t}{I_2 - I_1} = \frac{\mathcal{E}_c \Delta t}{I_1 - I_2}. \text{ Тогда } \Phi_c = \frac{\mathcal{E}_c \Delta t I_2}{I_1 - I_2}.$$

$$\Phi_c = \frac{-14,0 \text{ В} \cdot 9,50 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot 2,40 \text{ А}}{1,60 \text{ А} - 2,40 \text{ А}} = 0,399 \text{ Вб} = 399 \text{ мВб}.$$

Приращение энергии магнитного поля катушки

$$\Delta W_M = W_{M2} - W_{M1} = \frac{LI_2^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2} = \frac{L}{2}(I_2^2 - I_1^2) = \frac{-\mathcal{E}_c \Delta t (I_2^2 - I_1^2)}{2(I_2 - I_1)} = \frac{-\mathcal{E}_c \Delta t (I_2 + I_1)}{2}.$$

$$\Delta W_M = \frac{-(-14,0 \text{ В}) \cdot 9,50 \cdot 10^{-3} \text{ с} \cdot (2,40 \text{ А} + 1,60 \text{ А})}{2} = 0,266 \text{ Дж} = 266 \text{ мДж}.$$

Ответ: $\Phi_c = 399$ мВб, $\Delta W_M = 266$ мДж.

Упражнение 25

1. По замкнутому проводящему контуру проходит электрический ток силой $I = 1,2$ А. Магнитное поле этого тока создаёт магнитный поток $\Phi = 3,0$ мВб через поверхность, ограниченную контуром. Определите индуктивность контура.

2. При равномерном изменении силы тока в катушке на $\Delta I = -4,0$ А за промежуток времени $\Delta t = 0,10$ с в катушке возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 20$ В. Определите индуктивность катушки.

3. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке индуктивностью $L = 1,2$ Гн, при равномерном изменении силы тока от $I_1 = 2,0$ А до $I_2 = 6,0$ А

за промежуток времени $\Delta t = 0,60$ с. Определите, на сколько при этом изменилась энергия магнитного поля.

4. На рисунке 241 представлен график зависимости силы тока в катушке индуктивностью $L = 10$ мГн от времени. Определите ЭДС самоиндукции через промежутки времени $t_1 = 10$ с и $t_2 = 20$ с от момента начала отсчёта времени.

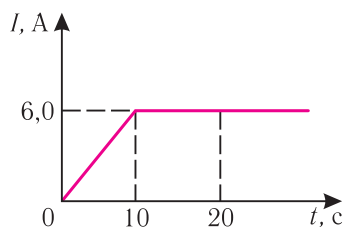


Рис. 241

5. Сила тока в катушке равномерно уменьшилась от $I_1 = 10$ А до $I_2 = 5,0$ А. При этом энергия магнитного поля изменилась на $\Delta W_m = -3,0$ Дж. Определите индуктивность катушки и первоначальное значение энергии магнитного поля.

6. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке индуктивностью $L = 0,12$ Гн, при равномерном уменьшении силы тока от $I_1 = 8,0$ А, если за промежуток времени $t_1 = 0,20$ с энергия магнитного поля уменьшилась в два раза.

Лабораторный эксперимент

Лабораторная работа 1

Изучение изотермического процесса

Цель: исследовать зависимость давления газа данной массы от занимаемого им объёма при постоянной температуре.

Оборудование: прозрачная силиконовая трубка диаметром 8—10 мм с зажимом или пробкой на конце (стеклянная трубка диаметром 10—12 мм и длиной 60 см, запаянная с одного конца); мензурка (250 мл) с водой комнатной температуры; поддон; измерительная лента (линейка); барометр-анероид (один на класс).

Вывод расчётной формулы

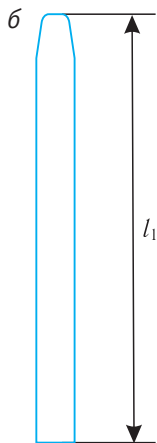
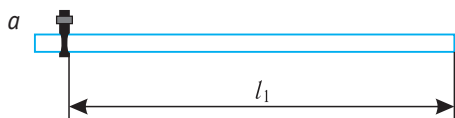


Рис. 242

Согласно закону Бойля—Мариотта при постоянной температуре параметры p_1 и V_1 начального состояния газа данной массы и параметры p_2 и V_2 его конечного состояния связаны соотношением $p_1 V_1 = p_2 V_2$.

Исследуемым газом в выполняемой работе является воздух, находящийся внутри прозрачной силиконовой трубки с зажимом или пробкой на конце (стеклянной трубки) (рис. 242, а (б)).

Поскольку внутренняя полость трубки имеет форму цилиндра и площадь S её поперечного сечения одинакова по всей длине трубки, то $V_1 = Sl_1$ и $V_2 = Sl_2$, где l_1 и l_2 — длины столба воздуха в трубке в начальном и конечном состояниях соответственно.

Следовательно, $p_1 Sl_1 = p_2 Sl_2$ или $\frac{p_2}{p_1} = \frac{l_1}{l_2}$.

При выполнении работы проверяют справедливость этого равенства.

Порядок выполнения работы

1. Закройте зажим на конце силиконовой трубки и измерьте длину l_1 столба воздуха в трубке в начальном состоянии.
2. Измерьте давление p_1 воздуха в начальном состоянии, используя барометр-анероид.

3. Поставьте мензурку на поддон и заполните её водой комнатной температуры так, чтобы при погружении трубки вода в мензурке поднялась до её верхнего края.

4. Погрузите в воду трубку так, чтобы её открытый конец оказался у дна мензурки (рис. 243).

5. Наблюдайте за поступлением воды в трубку. Когда оно прекратится, измерьте длину ΔL столба воды, вошедшей в трубку.

6. Измерьте разность уровней h воды в мензурке и трубке.

7. Вычислите длину l_2 столба воздуха в трубке в конечном состоянии: $l_2 = l_1 - \Delta L$.

8. Вычислите давление p_B столба воды по формуле $p_B = \rho gh$, где ρ — плотность воды (примите $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$). Значение ускорения свободного падения примите $g = 9,810 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

9. Вычислите давление p_2 воздуха в трубке в конечном состоянии: $p_2 = p_1 + p_B$.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

10. Вычислите отношения $\frac{p_2}{p_1}$ и $\frac{l_1}{l_2}$. Результаты вычислений, округлив с точностью до тысячных, занесите в таблицу. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

l_1 , м	p_1 , Па	ΔL , м	h , м	l_2 , м	p_B , Па	p_2 , Па	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{l_1}{l_2}$

11. Вычислите относительную погрешность ε_1 измерения отношения $\frac{p_2}{p_1}$:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta p}{p_1} + \frac{\Delta p}{p_2},$$

где $\Delta p = \Delta_{\text{и}} p + \Delta_0 p$ ($\Delta_{\text{и}}$ — абсолютная инструментальная погрешность прибора; Δ_0 — абсолютная погрешность отсчёта (см. приложение).

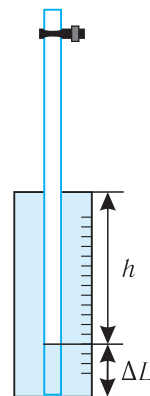


Рис. 243

12. Вычислите абсолютную погрешность Δ_1 измерения отношения $\frac{p_2}{p_1}$:

$$\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{p_2}{p_1}.$$

13. Вычислите относительную погрешность ε_2 измерения отношения $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \text{ где } \Delta l = \Delta_{\text{и}} l + \Delta_0 l.$$

14. Вычислите абсолютную погрешность Δ_2 измерения отношения $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}.$$

15. Запишите результаты измерений в виде двойных неравенств:

$$\frac{p_2}{p_1} - \Delta_1 < \frac{p_2}{p_1} < \frac{p_2}{p_1} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

16. Сравните полученные интервалы значений и сделайте вывод.

Если интервалы перекрываются, то отношения давлений и длин столба воздуха в трубке при данной относительной погрешности измерений одинаковы, что и подтверждает справедливость проверяемого равенства.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях для определения параметров состояния газа можно использовать уравнение $pV = \text{const}$?
2. Почему при выполнении данной работы процесс изменения объёма воздуха можно считать практически изотермическим?
3. Что влияет на точность полученных результатов?

Суперзадание

Определите математическую зависимость между плотностью и давлением воздуха в трубке. Используя результаты, полученные при выполнении данной работы, и термометр, постройте график зависимости плотности воздуха в трубке от давления.

Лабораторная работа 2

Изучение изобарного процесса

Цель: исследовать зависимость объёма газа данной массы от температуры при постоянном давлении.

Оборудование: прозрачная силиконовая трубка диаметром 8—10 мм и длиной 80—100 см с двумя зажимами (пробками) на концах; термометр; внешний стакан калориметра; измерительная лента (линейка); сосуд с водой при температуре 55—60 °С; сосуд с водой комнатной температуры.

Вывод расчётной формулы

Согласно закону Гей-Люссака при постоянном давлении параметры V_1 и T_1 начального состояния газа данной массы и параметры V_2 и T_2 его конечного

состояния связаны соотношением $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$.

Исследуемым газом в выполняемой работе является воздух, находящийся внутри прозрачной силиконовой трубки с зажимами (пробками) на концах.

Поскольку внутренняя полость трубки имеет форму цилиндра и площадь S её поперечного сечения одинакова по всей длине трубки, то $V_1 = Sl_1$ и $V_2 = Sl_2$, где l_1 и l_2 — длины столба воздуха в трубке в начальном (рис. 244, а) и конечном (рис. 244, б) состояниях соответственно.

Следовательно, $\frac{Sl_1}{T_1} = \frac{Sl_2}{T_2}$ или $\frac{T_1}{T_2} = \frac{l_1}{l_2}$.

При выполнении работы проверяют справедливость этого равенства.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте длину l_1 столба воздуха в трубке в начальном состоянии (см. рис. 244, а).

2. Трубку плотно уложите внутри стакана калориметра, предварительно закрыв зажим, который располагается вблизи дна. Верхний зажим оставьте открытым.

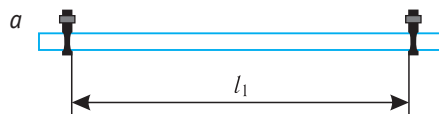
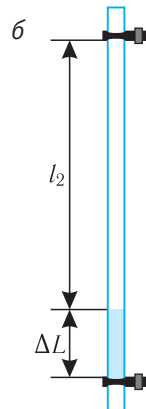


Рис. 244



3. Заполните стакан калориметра водой, предварительно нагретой до температуры 55—60 °С, так, чтобы конец трубки с верхним зажимом оказался погружённым в воду не более чем на 5—10 мм.

4. Поместите термометр в воду. Наблюдайте за выделением из трубки пузырьков воздуха. Как только оно прекратится, определите значение температуры T_1 тёплого воздуха, находящегося в трубке.

5. Закройте верхний зажим, слейте нагретую воду и заполните стакан водой комнатной температуры до прежнего уровня (конец трубки с верхним зажимом должен быть погружённым в воду не более чем на 5—10 мм). Откройте верхний зажим.

6. Через 1—2 минуты после установления теплового равновесия определите по показанию термометра температуру T_2 воздуха, находящегося в трубке.

7. Закройте верхний зажим и слейте воду из стакана калориметра. Извлеките трубку, встряхните её и, расположив вертикально, измерьте длину ΔL столба воды, вошедшей в трубку (см. рис. 244, б).

8. Вычислите длину l_2 столба воздуха в трубке после охлаждения:

$$l_2 = l_1 - \Delta L.$$

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

9. Вычислите отношения $\frac{T_1}{T_2}$ и $\frac{l_1}{l_2}$. Результаты вычислений, округлив с точностью до сотых, занесите в таблицу. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

l_1 , м	T_1 , К	T_2 , К	ΔL , м	l_2 , м	$\frac{T_1}{T_2}$	$\frac{l_1}{l_2}$

10. Вычислите относительную погрешность ϵ_1 измерения отношения $\frac{T_1}{T_2}$:

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}, \text{ где } \Delta T = \Delta_{\text{и}} T + \Delta_0 T.$$

11. Вычислите абсолютную погрешность Δ_1 измерения отношения $\frac{T_1}{T_2}$:

$$\Delta_1 = \epsilon_1 \frac{T_1}{T_2}.$$

12. Вычислите относительную погрешность ε_2 измерения отношения $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}, \text{ где } \Delta l = \Delta_{\text{и}} l + \Delta_0 l.$$

13. Вычислите абсолютную погрешность Δ_2 измерения отношения $\frac{l_1}{l_2}$:

$$\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}.$$

14. Запишите результаты измерений в виде двойных неравенств:

$$\frac{T_1}{T_2} - \Delta_1 < \frac{T_1}{T_2} < \frac{T_1}{T_2} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

15. Сравните полученные интервалы значений и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. При каких условиях для определения параметров состояния газа можно использовать уравнение $V = \text{const } T$?
2. Почему при выполнении данной работы процесс охлаждения воздуха можно считать практически изобарным?
3. Как определить, когда наступило выравнивание температуры воздуха в трубке и температуры нагретой воды в стакане калориметра?

Суперзадание

Используя оборудование для данной лабораторной работы, барометр-анероид и штангенциркуль, определите массу воздуха в трубке.

Лабораторная работа 3

Измерение поверхностного натяжения

Цель: измерить поверхностное натяжение жидкости.

Оборудование: капиллярная трубка; клин измерительный (металлическая игла); микрометр (штангенциркуль); линейка; стакан калориметра с дистиллированной водой; термометр для измерения температуры воздуха в кабинете.

Вывод расчётной формулы

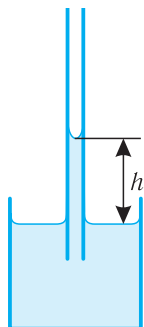


Рис. 245

Если поместить капиллярную трубку одним концом в полностью смачивающую её жидкость, налитую в широкий сосуд, то поверхность жидкости в трубке будет выше, чем в сосуде (рис. 245). Высоту подъёма жидкости в капиллярной трубке можно опреде-

лить по формуле $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$, где σ — поверхностное натяжение жидкости, ρ — плотность жидкости, r — внутренний радиус капиллярной трубки, g — модуль ускорения свободного падения.

Таким образом, зная высоту подъёма жидкости известной плотности в капиллярной трубке известного радиуса, можно

определить поверхностное натяжение этой жидкости: $\sigma = \frac{\rho g r h}{2}$

или $\sigma = \frac{\rho g D h}{4}$, где $D = 2r$ — внутренний диаметр капиллярной трубки.

При выполнении работы значение ускорения свободного падения примите

$$g = 9,810 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Значения поверхностного натяжения σ воды на границе с воздухом и плотности ρ дистиллированной воды при различной температуре t и нормальном атмосферном давлении приведены в таблице.

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
10	74,20	999,700	18	73,05	998,595
11	74,07	999,605	19	72,89	998,405
12	73,92	999,498	20	72,75	998,203
13	73,78	999,377	21	72,60	997,992
14	73,64	999,244	22	72,44	997,770
15	73,48	999,099	23	72,28	997,538
16	73,34	998,943	24	72,12	997,296
17	73,20	998,774	25	71,96	997,044

Порядок выполнения работы

1. Измерьте температуру воздуха в кабинете. Запишите в таблицу значение плотности ρ воды, соответствующее данной температуре.
2. Измерьте внутренний диаметр D капиллярной трубки, используя клин измерительный (металлическую иглу) и микрометр (штангенциркуль).

Для измерения диаметра капиллярной трубки вдвиньте в неё клин до упора и пометьте границу соприкосновения клина и трубки (рис. 246). Считая диаметр клина на этой границе равным внутреннему диаметру трубки, измерьте его, используя микрометр.



Рис. 246

3. Опустите капиллярную трубку в стакан с водой комнатной температуры. Наблюдайте подъём воды в капиллярной трубке. Через небольшой промежуток времени (примерно 1 мин), расположив капиллярную трубку так, чтобы она не касалась дна стакана, измерьте высоту h подъёма воды в трубке.
 4. Вычислите поверхностное натяжение σ воды.
- Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$D, \text{м}$	$h, \text{м}$	$\sigma, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$

5. Вычислите относительную погрешность ϵ_σ косвенных измерений поверхностного натяжения воды:

$$\epsilon_\sigma = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta h}{h}, \text{ где } \Delta D = \Delta_{\text{и}} D + \Delta_o D, \Delta h = \Delta_{\text{и}} h + \Delta_o h.$$

6. Вычислите абсолютную погрешность $\Delta \sigma$ косвенных измерений поверхностного натяжения воды: $\Delta \sigma = \epsilon_\sigma \sigma$.

7. Запишите результаты измерений поверхностного натяжения воды в виде

$$\sigma = (\sigma \pm \Delta \sigma) \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad \epsilon_\sigma = \quad \%$$

8. Сравните полученное и табличное значения поверхностного натяжения воды. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл поверхностного натяжения? В каких единицах СИ его измеряют?
2. Почему поверхностное натяжение зависит от рода жидкости?
3. Почему площадь свободной поверхности жидкости минимальна?

Суперзадание

Проанализируйте зависимость поверхностного натяжения данной жидкости от температуры, используя таблицу (с. 255). Как будет изменяться высота подъёма жидкости в капиллярной трубке при изменении температуры жидкости?

Лабораторная работа 4

Измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Цель: измерить ЭДС и внутреннее сопротивление источника постоянного тока.

Оборудование: гальванический элемент (батарейка 1,5—4,5 В); вольтметр; амперметр; реостат; ключ; соединительные провода.

Вывод расчётных формул

Согласно закону Ома для полной цепи ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока, его внутреннее сопротивление r , сила тока I в цепи и сопротивление R внешнего участка цепи связаны соотношением $\mathcal{E} = IR + Ir$.

С учётом того, что напряжение на внешнем участке цепи $U = IR$, получим

$$\mathcal{E} = U + Ir.$$

Если выполнить непосредственные измерения силы тока I_1 и I_2 и напряжения U_1 и U_2 при двух различных значениях сопротивления внешнего участка цепи, то получим систему, состоящую из двух уравнений:

$$\begin{cases} \mathcal{E} = U_1 + I_1 r, \\ \mathcal{E} = U_2 + I_2 r. \end{cases}$$

Отсюда внутреннее сопротивление источника постоянного тока

$$r = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2},$$

а его ЭДС

$$\mathcal{E} = \frac{I_1 U_2 - I_2 U_1}{I_1 - I_2}.$$

Вместо реостата можно использовать два резистора, сопротивления R_1 и R_2 которых известны. Тогда формулы для расчёта внутреннего сопротивления r и ЭДС $\mathcal{E}$

источника постоянного тока примут вид: $r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}$, $\mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}$.

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 247.

2. При разомкнутом ключе проверьте надёжность контактных соединений и правильность подключения электроизмерительных приборов.

3. Проведите не менее шести измерений силы тока и напряжения на внешнем участке цепи при различных положениях подвижного контакта реостата.

4. Вычислите внутреннее сопротивление r и ЭДС $\mathcal{E}$ источника постоянного тока для каждой пары результатов измерений.

5. Вычислите средние значения внутреннего сопротивления $\langle r \rangle$ и ЭДС $\langle \mathcal{E} \rangle$ источника тока.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

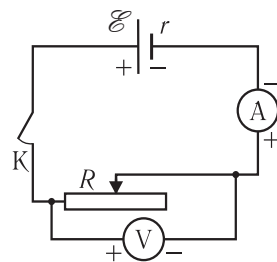


Рис. 247

№ опыта	U , В	I , А	r , Ом	$\langle r \rangle$, Ом	$\mathcal{E}$, В	$\langle \mathcal{E} \rangle$, В
1						
2						
3						
4						
5						
6						

6. Постройте график зависимости напряжения U на внешнем участке цепи от силы тока I в цепи.

7. Продлите график до пересечения с координатными осями. По графику определите ЭДС $\mathcal{E}$ источника тока. Используя данные графика, определите внутреннее сопротивление r источника тока.

Из графика и уравнения $\mathcal{E} = U + Ir$ следует, что при $I = 0$ (цепь разомкнута) $\mathcal{E} = U$; при $U = 0$ сила тока в цепи максимальна, и внутреннее сопротивление источника тока

можно определить по формуле $r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}}$.

8. При разомкнутом ключе подключите вольтметр к источнику тока и измерьте его ЭДС $\mathcal{E}$.

9. Сравните результаты вычисления среднего значения ЭДС $\langle \mathcal{E} \rangle$ источника тока (п. 5), определения ЭДС $\mathcal{E}$ по графику (п. 7) и прямых измерений ЭДС $\mathcal{E}$ (п. 8).

10. Вычислите абсолютную погрешность $\Delta \mathcal{E}$ прямых измерений ЭДС источника тока: $\Delta \mathcal{E} = \Delta_{\text{н}} \mathcal{E} + \Delta_0 \mathcal{E}$.

11. Вычислите относительную погрешность $\varepsilon_{\mathcal{E}}$ прямых измерений ЭДС источника тока: $\varepsilon_{\mathcal{E}} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}}$.

12. Запишите результаты прямых измерений ЭДС источника тока в виде $\mathcal{E} = (\mathcal{E} \pm \Delta \mathcal{E}) \text{ В}$; $\varepsilon_{\mathcal{E}} = \quad \%$.

Контрольные вопросы

1. Почему отличаются показания вольтметра, подключённого к источнику тока, при разомкнутом и при замкнутом ключе?

2. От чего зависит мощность тока на внешнем участке цепи для данного источника тока?

3. Как изменяется коэффициент полезного действия источника тока при увеличении длины активной части реостата?

Суперзадание

Используя результаты, полученные при выполнении данной работы, определите максимальную мощность тока на внешнем участке полной цепи.

Вычисление погрешностей измерений

Выполнение лабораторных работ связано с измерением физических величин, т. е. определением значений величин опытным путём с помощью измерительных приборов (средств измерения), и обработкой результатов измерений.

Различают прямые и косвенные измерения. При этом результат любого измерения является приблизительным, т. е. содержит погрешность измерения. Точность измерения физической величины характеризуют абсолютная и относительная погрешности.

Прямое измерение — определение значения физической величины непосредственно с помощью измерительного прибора.

Абсолютную погрешность прямых измерений определяют суммой абсолютной инструментальной погрешности и абсолютной погрешности отсчёта

$$\Delta x = \Delta_{\text{и}}x + \Delta_{\text{о}}x$$

при условии, что случайная погрешность и погрешность вычисления или отсутствуют, или незначительны и ими можно пренебречь.

Абсолютная инструментальная погрешность $\Delta_{\text{и}}x$ связана с классом точности прибора. Абсолютные инструментальные погрешности некоторых средств измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1

Средства измерений	Диапазон измерений	Абсолютная инструментальная погрешность
1	2	3
Линейки: металлические деревянные пластмассовые	150, 300, 500 мм 400, 500, 750 мм 200, 250, 300 мм	0,1 мм 0,5 мм 1 мм
Лента измерительная	150 см	0,5 см

Окончание таблицы 1

1	2	3
Мензурки 2-го класса	100, 200, 250 см ³	5 см ³
Амперметр школьный	2 А	0,05 А
Миллиамперметр	От 0 до $I_{\max}$	4 % максимального предела измерений $I_{\max}$
Вольтметр школьный	6 В	0,15 В
Термометр лабораторный	100 °С	1 °С
Барометр-анероид	720—780 мм рт. ст.	3 мм рт. ст.
Штангенциркули с ценой деления 0,1; 0,05 мм	155, 250, 350 мм	0,1; 0,05 мм в соответствии с ценой деления нониуса
Микрометры с ценой деления 0,01 мм	0—25, 25—50, 50—75 мм	0,004 мм

Абсолютная погрешность отсчёта $\Delta_0 x$ связана с дискретностью шкалы прибора. Если величину измеряют с точностью до целого деления шкалы прибора, то погрешность отсчёта принимают равной цене деления. Если при измерении значение величины округляют до половины деления шкалы, то погрешность отсчёта принимают равной половине цены деления.

Абсолютная погрешность определяет значение интервала, в котором лежит истинное значение измеренной величины: $x = x_{\text{изм}} \pm \Delta x$.

Относительную погрешность прямого измерения определяют отношением абсолютной погрешности к значению измеряемой величины: $\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} \cdot 100 \%$.

Относительная погрешность характеризует точность измерения: чем она меньше, тем точность измерения выше.

Косвенное измерение — определение значения физической величины с использованием формулы, связывающей её с другими величинами, измеренными непосредственно с помощью приборов.

Одним из методов определения погрешности косвенных измерений является метод границ погрешностей. Формулы для вычисления абсолютных и относительных погрешностей косвенных измерений методом границ погрешностей представлены в таблице 2.

Таблица 2

Вид функции y	Абсолютная погрешность Δy	Относительная погрешность $\frac{\Delta y}{y}$
1	2	3
$x_1 + x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{ x_1 + x_2 }$
$x_1 - x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{ x_1 - x_2 }$
Cx	$C\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x}$
$x_1 x_2$	$ x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1$	$\frac{\Delta x_1}{ x_1 } + \frac{\Delta x_2}{ x_2 }$
$\frac{x_1}{x_2}$	$\frac{ x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1}{x_2^2}$	$\frac{\Delta x_1}{ x_1 } + \frac{\Delta x_2}{ x_2 }$
x^n	$ n x ^{n-1} \Delta x$	$ n \frac{\Delta x}{ x }$
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \ln x }$

Окончание таблицы 2

1	2	3
$\sin x$	$ \cos x \Delta x$	$\frac{\Delta x}{ \operatorname{tg} x }$
$\cos x$	$ \sin x \Delta x$	$ \operatorname{tg} x \Delta x$
$\operatorname{tg} x$	$\frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{ \sin 2x }$

Абсолютную погрешность табличных величин и фундаментальных физических постоянных определяют как половину единицы последнего разряда значения величины.

Ответы к упражнениям

Упражнение 1. 1. $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{H}_2\text{O}) = 3,0 \cdot 10^{-23} \text{ г}$; $M(\text{CO}_2) = 44 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{CO}_2) = 7,3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$; $M(\text{NH}_3) = 17 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{NH}_3) = 2,8 \cdot 10^{-23} \text{ г}$; $M(\text{HNO}_3) = 63 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$, $m_0(\text{HNO}_3) = 1,0 \cdot 10^{-22} \text{ г}$. 2. $v = 11 \text{ моль}$, $N = 6,6 \cdot 10^{24}$. 3. $m = 2,5 \text{ г}$. 4. $\frac{N_{\text{м}}}{N_{\text{а}}} = 1,4$. 5. $V = 17 \text{ см}^3$. 6. $l = 1,6 \cdot 10^{-9} \text{ м}$, $d = 6,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$, $m_0 = 4,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$. 7. $m = 78 \text{ г}$. 8. $V = 3,5 \text{ л}$. 9. $N_2 = 1,3 \cdot 10^{14}$.

Упражнение 2. 1. $n = 2,3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$. 2. $p_2 = 28 \text{ кПа}$. 3. $\langle E_{\text{к}} \rangle = 5,6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. 4. $\langle E_{\text{к}} \rangle = 1,5 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}$. 5. $\langle v^2 \rangle = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$. 6. $\frac{p_2}{p_1} = 6$. 7. $\frac{p_2}{p_1} = 2,2$.

Упражнение 3. 1. $T = 220 \text{ К}$. 2. $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = -153 \text{ }^\circ\text{C}$. 3. $\langle E_{\text{к}} \rangle = 6,1 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$. 4. $N = 1,0 \cdot 10^{21}$. 5. $p = 1,2 \text{ МПа}$. 6. $\Delta t = 297 \text{ }^\circ\text{C}$. 7. $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. 8. $t = 98 \text{ }^\circ\text{F}$. 9. Увеличится на 44 %.

Упражнение 4. 1. $v = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ моль}$. 2. $p = 0,47 \text{ МПа}$. 3. $p_2 = 1,5 \text{ МПа}$. 4. $T_1 = 286 \text{ К}$. 8. $V_2 = 7,8 \text{ л}$. 9. Утечки газа не было. 10. $p_3 = 3,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Упражнение 5. 3. $F_{\text{н}} = 12 \text{ мН}$, $A_{\text{вн}} = 0,96 \text{ мДж}$. 4. Можно, так как $F_{\text{н}} > mg$. 5. $F_{\text{н}} = 28 \text{ мкН}$. 6. $V = 1,0 \text{ см}^3$.

Упражнение 6. 1. $\varphi = 66 \%$. 2. $\varphi = 69 \%$. 3. При температуре $t < 10 \text{ }^\circ\text{C}$. 4. $\Delta m = 2,9 \cdot 10^6 \text{ кг}$. 5. $\varphi = 60 \%$, $\rho = 7,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. 6. $t_{\text{в}} = 13 \text{ }^\circ\text{C}$. 7. $\varphi_3 = 26 \%$. 8. $\varphi_2 = 2,9 \%$.

Упражнение 7. 1. $U = 0,37$ кДж. 2. $\Delta U = 0,50$ кДж. 3. $U = 1,8$ кДж.

4. $\frac{U_2}{U_1} = 2,0$. 5. $U = 0,90$ МДж. 6. $N = 1,9 \cdot 10^{20}$. 7. $p_1 = 1,5 \cdot 10^5$ Па.

Упражнение 8. 1. $\Delta V = 4,0 \cdot 10^{-4}$ м³. 2. $A = 3,5$ кДж. 3. $m = 0,47$ кг.
4. $A = 5,5$ кДж. 5. $A = 2,5$ кДж. 6. $T_1 = 217$ К.

Упражнение 9. 1. $A = 84$ Дж. 2. $\Delta U = -265$ Дж, $T_2 < T_1$. 3. $Q = 6,4$ кДж.
4. $Q = 358$ кДж. 5. $\nu = 0,29$ моль. 6. $A = 12$ кДж, $Q = 31$ кДж. 7. $\Delta U = 75,0$ кДж,
 $Q = 125$ кДж. 8. $m_{\text{п}} = 68$ г. 10. $\frac{V_2}{V_1} = 1,8$.

Упражнение 10. 1. $\eta_t = 25$ %. 2. $\eta_K = 25,6$ %. 3. $Q_1 = 1,5$ кДж. 4. $\eta_t = 25,0$ %, $T_1 = 400$ К. 5. На 58 %. 6. $m_{\text{л}} = 8,2$ кг. 7. $N = 8$. 8. $\langle P \rangle = 9,8$ кВт. 9. $N = 110$ дней.

Упражнение 11. 2. $q = -8,0 \cdot 10^{-14}$ Кл. 3. $q = 4,8 \cdot 10^5$ Кл. 5. $q'_1 = q'_2 = 1,5q$.
6. $q'_2 = -2,4 \cdot 10^{-11}$ Кл, $N_1 = 1,5 \cdot 10^8$. 7. $\frac{N_{\text{п}}}{N} = 1,6 \cdot 10^{-13}$.

Упражнение 12. 1. $F = 8,1$ мкН. 2. $r_2 = 2r_1$. 3. $r_2 = 53$ см. 4. $q_1 = q_2 = 3,4 \cdot 10^{-12}$ Кл. 5. $F = 2,7 \cdot 10^{-7}$ Н, направлена к заряду q_1 . 6. $q_2 = -74$ нКл.
7. $|q| = 1,0$ мкКл. 8. $q_1 = -0,58$ нКл.

Упражнение 13. 1. $F = 0,64$ мН. 2. $q = 4,0 \cdot 10^{-11}$ Кл. 3. $\frac{q_1}{q_2} = 16$.
4. $E = 49 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, вверх. 5. $\alpha = 5,0^\circ$. 6. $E = 6,8 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 7. $E = 11 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 8. $|\vec{a}| = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$,
 $\alpha = 21^\circ$, $S = 5,5$ м.

Упражнение 14. 2. $A = -10$ мкДж, $\Delta W_{\text{п}} = 10$ мкДж. 3. $A = 8,0$ мкДж,
 $\Delta W_{\text{п}} = -8,0$ мкДж, $\Delta W_{\text{к}} = 8,0$ мкДж. 4. $\varphi_1 = -30$ В, $\varphi_2 = 30$ В. 5. $\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = 3$.

6. $E = 0,72 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $\varphi = 0$. 7. а) $\varphi_1 = 0,36 \text{ кВ}$, б) $\varphi_2 = -0,36 \text{ кВ}$; в) $\varphi_3 = 0$.

8. $\frac{v_e}{v_p} = 42,8$. 9. Если точка расположена между зарядами, то $E_{p1} = 12,5 \frac{\text{В}}{\text{м}}$;

если заряды находятся по одну сторону от точки, то $E_{p2} = 10,0 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Упражнение 15. 1. $q = 40 \text{ нКл}$. 2. $U_{23} = 0,24 \text{ кВ}$. 3. $U = 1,44 \cdot 10^9 \text{ В}$.
4. $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 5. $q = 0,13 \text{ нКл}$. 6. $v = 2,7 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. 7. $\varphi = 0,66 \text{ кВ}$. 8. $A_{\text{внеш}} = 0,31 \text{ мкДж}$.

Упражнение 16. 1. $C = 25 \text{ мкФ}$. 2. $d = 4,9 \text{ мм}$. 3. $\frac{C_2}{C_1} = 6$. 4. $q = 0,80 \text{ мкКл}$.
5. $E = 0,45 \frac{\text{МВ}}{\text{м}}$. 6. $E_2 = 8,4 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 7. $d = 5,0 \text{ мм}$. 8. $F = 44 \text{ мН}$.

Упражнение 17. 1. $W = 4,0 \text{ мДж}$. 2. $d = 2,00 \text{ см}$. 3. $W_2 = 4 \text{ мкДж}$.
4. $W = 0,22 \text{ мкДж}$, $E = 25 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$. 5. $E = 22 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, $U_2 = 0,66 \text{ кВ}$. 6. $U = 1,9 \text{ В}$.

Упражнение 18. 1. $A_{\text{ст}} = 0,54 \text{ кДж}$. 2. $I = 2 \text{ А}$, $U_1 = 4 \text{ В}$, $U_2 = 1 \text{ В}$.
4. $I_{\text{к.з}} = 5,5 \text{ А}$. 5. $P_{\text{полн}} = 10 \text{ Вт}$. 6. $Q = 2,1 \text{ кДж}$. 7. $U = 9,6 \text{ В}$, $I_1 = 2,4 \text{ А}$, $I_2 = 1,6 \text{ А}$.
8. $d = 40 \text{ мм}$. 9. $P_{\text{мех}} = 1,9 \text{ кВт}$, $\eta = 73 \%$. 10. $\Delta t = 12 \text{ }^\circ\text{С}$.

Упражнение 19. 1. $\rho_0 = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. 2. $\alpha = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. 3. $\Delta t = 5,0 \cdot 10^2 \text{ }^\circ\text{С}$. 4. $t_2 = 715 \text{ }^\circ\text{С}$. 5. $\Delta U = 14 \text{ Дж}$.

Упражнение 20. 1. $m = 5,5 \text{ г}$. 2. $N = 1,2 \cdot 10^{19}$. 3. $A = 2,0 \text{ мДж}$. 4. $m = 2,4 \text{ г}$.
5. $W = 94 \text{ кДж}$. 6. $F = 2,23 \text{ кН}$.

Упражнение 22. 1. $F_{\max} = 1,6 \text{ Н}$, $F_{\min} = 0$. 2. $\alpha = 45^\circ$. 3. $B = 0,40 \text{ Тл}$, от наблюдателя. 4. $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. 5. $I = 11 \text{ А}$. 6. $B_p = 0,05 \text{ Тл}$. 7. $B_{\text{I max}} = 0,05 \text{ Тл}$. 8. $B_{2\text{min}} = 0,03 \text{ Тл}$. 9. $r = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$. 10. $B_p = 5,8 \text{ мкТл}$.

Упражнение 23. 1. $F_{\text{Л}} = 5,1 \cdot 10^{-16} \text{ Н}$. 2. $B = 2,8 \text{ мТл}$. 3. $T = 3,1 \cdot 10^3 \text{ с}$. 4. $W_{\text{к}} = 2,3 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$. 5. $U = 2,8 \cdot 10^2 \text{ В}$. 6. $v = 6 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Упражнение 24. 1. а) $\Phi_1 = 18 \text{ мВб}$, б) $\Phi_2 = 0$, в) $\Phi_3 = 9,0 \text{ мВб}$. 2. $\Phi = 32 \text{ мВб}$. 3. $\Delta t = 0,25 \text{ с}$. 4. $\Phi_1 = 1,0 \text{ Вб}$. 5. $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -1,9 \text{ В}$. 6. $Q = 4,6 \text{ мДж}$. 7. $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -0,4 \text{ В}$. 8. а) $q_1 = 0,29 \text{ Кл}$, б) $q_2 = 0,14 \text{ Кл}$.

Упражнение 25. 1. $L = 2,5 \text{ мГн}$. 2. $L = 0,50 \text{ Гн}$. 3. $\mathcal{E}_{\text{с}} = -8,0 \text{ В}$, $\Delta W_{\text{м}} = 19 \text{ Дж}$. 4. При $0 \leq t \leq 10 \text{ с}$ $\mathcal{E}_{\text{с1}} = -6,0 \text{ мВ}$, при $t > 10 \text{ с}$ $\mathcal{E}_{\text{с2}} = 0$. 5. $L = 80 \text{ мГн}$, $W_{\text{м1}} = 4,0 \text{ Дж}$. 6. $\mathcal{E}_{\text{с}} = 1,4 \text{ В}$.

Содержание

Как работать с учебным пособием	3
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	4
Глава 1. Основы молекулярно-кинетической теории	6
§ 1. Основные положения молекулярно-кинетической теории	6
§ 2. Масса и размеры молекул. Количество вещества	13
§ 3. Макро- и микропараметры. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа	18
§ 4. Тепловое равновесие. Температура — мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества. Закон Дальтона	26
§ 5. Уравнение состояния идеального газа. Изотермический, изобарный и изохорный процессы	33
§ 6. Строение и свойства твёрдых тел	43
§ 7. Строение и свойства жидкостей. Поверхностное натяжение	47
§ 8. Испарение и конденсация. Насыщенный пар. Влажность воздуха ...	56
Глава 2. Основы термодинамики	66
§ 9. Термодинамическая система. Термодинамическое равновесие. Внутренняя энергия. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа	66
§ 10. Работа в термодинамике. Количество теплоты	71
§ 11. Первый закон термодинамики. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам в идеальном газе. Адиабатный процесс	78
§ 12. Тепловые двигатели. Принцип действия тепловых двигателей и их КПД. Экологические проблемы использования тепловых двигателей	88
ЭЛЕКТРОДИНАМИКА	98
Глава 3. Электростатика	100
§ 13. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда	100

§ 14. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона	104
§ 15. Электростатическое поле. Напряжённость и линии напряжённости электростатических полей	112
§ 16. Потенциальность электростатического поля. Потенциал	121
§ 17. Разность потенциалов электростатического поля. Напряжение. Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля	130
§ 18. Проводники в электростатическом поле	134
§ 19. Диэлектрики в электростатическом поле	138
§ 20. Электроёмкость. Конденсаторы. Электроёмкость плоского конденсатора	143
§ 21. Энергия электростатического поля конденсатора	152
Глава 4. Постоянный электрический ток	157
§ 22. Условия существования постоянного электрического тока. Сторонние силы. ЭДС источника тока	157
§ 23. Закон Ома для полной электрической цепи. КПД источника тока	160
Глава 5. Электрический ток в различных средах	168
§ 24. Электрический ток в металлах. Зависимость сопротивления металлов от температуры. Сверхпроводимость	168
§ 25. Электрический ток в электролитах. Законы электролиза Фарадея	176
§ 26. Электрический ток в газах. Самостоятельный и несамостоятельный разряды. Плазма	185
§ 27. Электрический ток в полупроводниках. Собственная проводимость полупроводников	192
§ 28. Примесная проводимость полупроводников. Электронно-дырочный переход	196
Глава 6. Магнитное поле. Электромагнитная индукция	202
§ 29. Действие магнитного поля на проводник с током. Взаимодействие проводников с током	202

§ 30. Индукция магнитного поля. Линии магнитной индукции	208
§ 31. Закон Ампера. Принцип суперпозиции магнитных полей	215
§ 32. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле	225
§ 33. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции. Правило Ленца	232
§ 34. Закон электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле	237
§ 35. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля катушки с током	242
Лабораторный эксперимент	249
Приложение	260
Ответы к упражнениям	264

(Название и номер учреждения образования)

Учебный год	Имя и фамилия учащегося	Состояние учебного пособия при получении	Отметка учащемуся за пользование учебным пособием
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			
20 /			

Учебное издание

Громыко Елена Владимировна
Зенькович Владимир Иванович
Луцевич Александр Александрович
Слесарь Инесса Эдуардовна

ФИЗИКА

Учебное пособие для 10 класса
учреждений общего среднего образования
с русским языком обучения

Редактор	<i>Г. И. Кошевникова</i>
Художник обложки	<i>Е. В. Максимова</i>
Художники	<i>Е. В. Максимова, К. К. Шестовский</i>
Компьютерный набор	<i>Н. М. Хаманеевой</i>
Компьютерная вёрстка	<i>Н. М. Хаманеевой</i>
Корректор	<i>Г. И. Кошевникова</i>

Подписано в печать 22.05.2013. Формат 70 × 90 ¹/₁₆.

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 19,89. Уч.-изд. л. 15 + 0,4 форзац. Тираж 106 440 экз. Заказ .

РУП «Издательство “Адукацыя і выхаванне”».

ЛИ № 02330/639 от 31.01.2012.

Ул. Будённого, 21, 220070, г. Минск.

ОАО «Полиграфический комбинат им. Я. Коласа».

ЛП № 02330/0150496 от 11.03.2009.

Ул. Красная, 23, 220600, г. Минск.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Г Р У П П Ы																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,00794 1 H ВОДОРОД																	4,0026 2 He ГЕЛИЙ
2	6,941 3 Li ЛИТИЙ	9,0122 4 Be БЕРИЛЛИЙ																
3	22,9898 11 Na НАТРИЙ	24,305 12 Mg МАГНИЙ																
4	39,0983 19 K КАЛИЙ	40,078 20 Ca КАЛЬЦИЙ	44,956 21 Sc СКАНДИЙ	47,87 22 Ti ТИТАН	50,942 23 V ВАНАДИЙ	51,996 24 Cr ХРОМ	54,938 25 Mn МАРГАНЕЦ	55,845 26 Fe ЖЕЛЕЗО	58,933 27 Co КОБАЛЬТ	58,693 28 Ni НИКЕЛЬ	63,546 29 Cu МЕДЬ	65,39 30 Zn ЦИНК	69,723 31 Ga ГАЛЛИЙ	72,61 32 Ge ГЕРМАНИЙ	74,922 33 As МЫШЬЯК	78,96 34 Se СЕЛЕН	79,904 35 Br БРОМ	83,80 36 Kr КРИПТОН
5	85,468 37 Rb РУБИДИЙ	87,62 38 Sr СТРОНЦИЙ	88,906 39 Y ИТТРИЙ	91,224 40 Zr ЦИРКОНИЙ	92,906 41 Nb НИОБИЙ	95,94 42 Mo МОЛИБДЕН	[98] 43 Tc ТЕХНЕЦИЙ	101,07 44 Ru РУТЕНИЙ	102,905 45 Rh РОДИЙ	106,42 46 Pd ПАЛЛАДИЙ	107,868 47 Ag СЕРЕБРО	112,411 48 Cd КАДМИЙ	114,82 49 In ИНДИЙ	118,71 50 Sn ОЛОВО	121,76 51 Sb СУРЬМА	127,60 52 Te ТЕЛЛУР	126,904 53 I ИОД	131,29 54 Xe КСЕНОН
6	132,905 55 Cs ЦЕЗИЙ	137,327 56 Ba БАРИЙ	57-71 57-71 ЛАНТАНИДЫ	178,49 72 Hf ГАФНИЙ	180,9479 73 Ta ТАНТАЛ	183,85 74 W ВОЛЬФРАМ	186,207 75 Re РЕНИЙ	190,2 76 Os ОСМИЙ	192,22 77 Ir ИРИДИЙ	195,08 78 Pt ПЛАТИНА	196,96654 79 Au ЗОЛОТО	200,59 80 Hg РУТУТЬ	204,3833 81 Tl ТАЛЛИЙ	207,2 82 Pb СВИНЕЦ	208,98037 83 Bi ВИСМУТ	208,9824 84 Po ПОЛОНИЙ	209,9871 85 At АСТАТ	222,0176 86 Rn РАДОН
7	[223] 87 Fr ФРАНЦИЙ	[226] 88 Ra РАДИЙ	89-103 89-103 АКТИНИДЫ	[261] 104 Rf РЕЗЕРФОРДИЙ	[262] 105 Db ДУБИЙ	[266] 106 Sg СИБОРГИЙ	[264] 107 Bh БОРИЙ	[269] 108 Hs ХАССИЙ	[268] 109 Mt МЕЙТНЕРИЙ	[271] 110 Ds ДАРМШТАДИЙ	[272] 111 Rg РЕНТГЕНИЙ	[277] 112 Cn КОПЕРНИКИЙ	[284] 113 Uut УНУНВИЙ	[287] 114 Fl ФЛЕРОВИЙ	[288] 115 Uup УНУНПЕННИЙ	[291] 116 Lv ЛИВЕРМОРИЙ	[293] 117 Uus УНУНЗЕННИЙ	[293] 118 Uuo УНУНОВИЙ

Относительная атомная масса

Символ элемента

Атомный номер

Название элемента

ЖЕЛЕЗО

Периодический закон
Д. И. Менделеева

Свойства атомов
химических элементов,
а также состав и
свойства образуемых
ими веществ находятся
в периодической
зависимости от зарядов
атомных ядер.

Лантаниды

138,9055 57 La ЛАНТАН	140,115 58 Ce ЦЕРИЙ	140,907 59 Pr ПРАЗЕОДИМ	144,24 60 Nd НЕОДИМ	144,913 61 Pm ПРОМЕТИЙ	150,36 62 Sm САМАРИЙ	151,965 63 Eu ЕВРОПИЙ	157,25 64 Gd ГАДОЛИНИЙ	158,92534 65 Tb ТЕРБИЙ	162,50 66 Dy ДИСПРОЗИЙ	164,93032 67 Ho ГОЛЬМИЙ	167,26 68 Er ЭРБИЙ	168,93421 69 Tm ТУЛИЙ	173,04 70 Yb ИТТЕРБИЙ	174,967 71 Lu ЛЮТЕЦИЙ
---	---	---	---	--	--	---	--	--	--	---	--	---	---	---

Актиниды

[227] 89 Ac АКТИНИЙ	232,0381 90 Th ТОРИЙ	231,0359 91 Pa ПРОТАКТИНИЙ	238,0289 92 U УРАН	237,0482 93 Np НЕПУНИЙ	244,0642 94 Pu ПЛУТОНИЙ	243,0614 95 Am АМЕРИЦИЙ	247,0703 96 Cm КЮРИЙ	247,0703 97 Bk БЕРКЛИЙ	251,0796 98 Cf КАЛИФОРНИЙ	252,083 99 Es ЭЙНШТЕЙНИЙ	257,0951 100 Fm ФЕРМИЙ	258,099 101 Md МЕНДЕЛЕВИЙ	259,1009 102 No НОБЕЛИЙ	260,105 103 Lr ЛОУРЕНСИЙ
---	--	--	--	--	---	---	--	--	---	--	--	---	---	--

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Количество вещества	Масса молекулы	Концентрация частиц вещества
$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$	$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{m}{N}$	$n = \frac{N}{V}$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа		
$p = \frac{1}{3}nm_0\langle v^2 \rangle$	$p = \frac{2}{3}n\langle E_k \rangle$	$p = nkT$
Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа	Закон Дальтона	
$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2}kT$	$p = p_1 + p_2 + \dots + p_i$	
Относительная влажность воздуха	Поверхностное натяжение	Высота подъёма жидкости в капилляре
$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100\%$	$\sigma = \frac{E_{\text{пов}}}{S} = \frac{F_n}{l}$	$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$

Уравнение состояния идеального газа		
уравнение Клапейрона	уравнение Клапейрона—Менделеева	
$\frac{pV}{T} = \text{const}$	$pV = \frac{m}{M}RT$	
Изопроцессы в идеальном газе		
изотермический	изобарный	изохорный
$p = \frac{\text{const}}{V}$	$V = \text{const } T$	$p = \text{const } T$

Первый закон термодинамики $\Delta U = Q + A'$			
изохорный процесс	изотермический процесс	изобарный процесс	адиабатный процесс
$Q = \Delta U$	$Q = A$	$Q = \Delta U + A$	$\Delta U = -A$

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Электростатика		
Закон сохранения электрического заряда $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$		
Закон Кулона	Напряжённость электростатического поля	Потенциал электростатического поля
$F = k \frac{ q_1 \cdot q_2 }{r^2}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$	$\varphi = \frac{W_n}{q_0}$
Поле, создаваемое в вакууме или в воздухе точечным зарядом		
модуль напряжённости		потенциал
$E = k \frac{ q }{r^2}$		$\varphi = k \frac{q}{r}$
Работа сил электростатического поля по перемещению заряда		
в однородном электростатическом поле		между двумя точками электростатического поля
$A = q_0 E d$		$A_{12} = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}$
Емкость конденсатора	Емкость плоского конденсатора	Энергия электростатического поля заряженного конденсатора
$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$	$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$	$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$

Постоянный ток		
ЭДС источника тока	Закон Ома для полной электрической цепи	Первый закон электролиза
$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$	$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$	$m = kq$

Электромагнитные явления		
Закон Ампера	$F_A = BI\Delta l \sin \alpha$	Сила Лоренца $F_L = qvB \sin \alpha$
Закон электромагнитной индукции		Энергия магнитного поля катушки с током
$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	$W_m = \frac{LI^2}{2}$