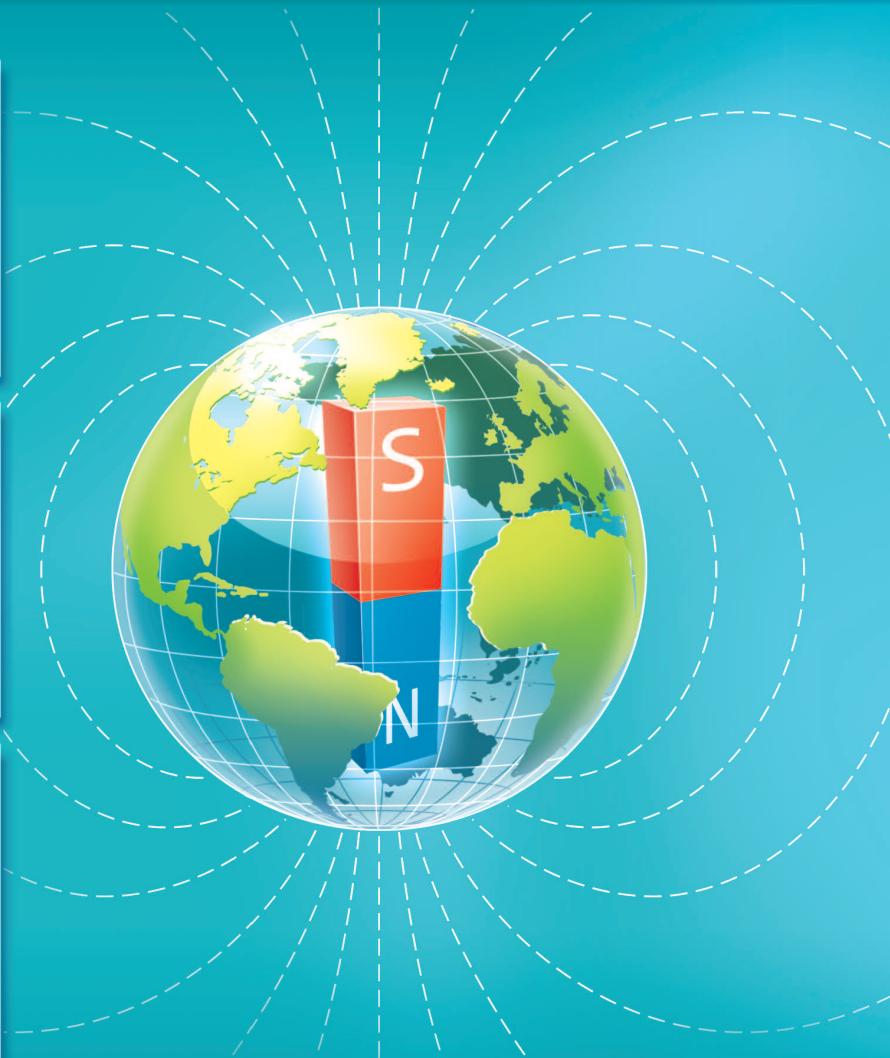


ФИЗИКА 10



ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Количество вещества	Масса молекулы	Концентрация частиц вещества
$v = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$	$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{m}{N}$	$n = \frac{N}{V}$

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle \quad p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle \quad p = n k T$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} k T$$

Уравнение состояния идеального газа

уравнение Клапейрона

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

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

уравнение Клапейрона — Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

Изопроцессы в идеальном газе

изобарный

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

изохорный

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

Первый закон термодинамики $\Delta U = Q + A'$

изохорный процесс

$$Q = \Delta U$$

изотермический процесс

$$Q = A$$

изобарный процесс

$$Q = \Delta U + A$$

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя

$$\eta_t = \frac{A_{\text{пп}}}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

<p>Электростатика</p> <p>Закон сохранения электрического заряда $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$</p> <p>Закон Кулона</p> <p>$F = k \frac{ q_1 \cdot q_2 }{\epsilon r^2}$</p> <p>Поле, создаваемое в однородной среде точечным зарядом</p> <p>модуль напряжённости</p> <p>$E = k \frac{ q }{\epsilon r^2}$</p> <p>Работа сил электростатического поля по перемещению заряда</p> <p>в однородном электростатическом поле</p> <p>$A = q_0 Ed$</p> <p>Электроёмкость конденсатора</p> <p>$C = \frac{q}{U}$</p> <p>Энергия электростатического поля заряженного конденсатора</p> <p>$A_{12} = q_0 (\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}$</p> <p>между двумя точками электростатического поля</p> <p>$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$</p>		
<p>Постоянный ток</p> <p>ЭДС источника тока</p> <p>$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$</p>	<p>Закон Ома для полной электрической цепи</p> <p>$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$</p>	
<p>Электромагнитные явления</p> <p>Закон Ампера $F_A = BI \Delta l \sin \alpha$</p> <p>Закон электромагнитной индукции</p> <p>$\mathcal{E}_{\text{инд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$</p>	<p>Сила Лоренца $F_L = q vB \sin \alpha$</p> <p>Энергия магнитного поля катушки с током</p> <p>$W_m = \frac{LI^2}{2}$</p>	

ФИЗИКА

Учебное пособие для 10 класса
учреждений общего среднего образования
с русским языком обучения
(с электронным приложением для повышенного уровня)

*Допущено Министерством образования
Республики Беларусь*

Минск
«Адукацыя і выхаванне»
2019

Правообладатель Адукацыя і выхаванне

УДК 53 (075.3=161.1)

ББК 22.3я721

Ф 50

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

Рецензенты: центр «Фундаментальные взаимодействия и астрофизика» государственного научного учреждения «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларусь» (доктор физико-математических наук, доцент, заведующий центром Ю. А. Курочкин); учитель физики квалификационной категории «учитель-методист» государственного учреждения образования «Гимназия № 1 г. Жодино» Э. Н. Якубовская

**Электронное приложение для повышенного уровня
размещено на ресурсе profil.adu.by**

ISBN 978-985-599-140-4

© Оформление. РУП «Издательство
“Адукацыя і выхаванне”», 2019

Правообладатель Адукацыя і выхаванне

Как работать с учебным пособием

В этом учебном году вы продолжите изучать тепловые и электромагнитные явления в разделах «Молекулярная физика» и «Электродинамика».

Материал учебного пособия соответствует базовому уровню обучения и содержит описания опытов, опорные факты и формулы, необходимые для дальнейшего изучения физики, а также дополнительные интересные сведения.

Чтобы работа с данным учебным пособием принесла больше пользы, дадим несколько советов. Прежде всего это книга, которую нужно читать вдумчиво. Прочитайте параграф от начала до конца, а затем приступайте к его детальной проработке. Иллюстрации и описания опытов, а также выполнение несложных заданий после каждого пункта параграфа помогут вам гораздо лучше понять физические явления, о которых идёт речь. В тексте параграфов встречаются определения физических понятий и величин, формулы, законы и принципы, которые нужно выучить, чтобы в дальнейшем уверенно применять их при решении задач по физике.

Из-за обилия задач физику считают одним из самых сложных учебных предметов. Поэтому практически после каждого параграфа имеются примеры решения задач: расчётных, качественных, графических. В подробном разборе этих задач вы найдёте полезные приёмы и методы, которые пригодятся при самостоятельном решении.

Каждый параграф начинается с краткого введения к тому, что вы будете изучать на уроке. Краткие выводы в конце параграфов, представленные, как правило, в виде структурно-логических схем, помогут обобщить и лучше усвоить учебный материал. Те, кто хочет более глубоко изучить физику, найдут в учебном пособии домашние экспериментальные задания и задания для проектной деятельности. Структурно-логическая схема в конце каждой темы поможет повторить основные понятия и формулы изучаемого учебного материала, а задания — проверить свои силы перед контрольной работой.

Желаем вам творческих успехов!

Авторы

В учебном пособии вы встретите следующие условные обозначения:



— краткие выводы



— контрольные вопросы и задания



— отсылка к просмотру видеороликов



— отсылка к электронному приложению для повышенного уровня.

Как работать с дополненной реальностью

Для работы с элементами дополненной реальности необходимо приложение «AIV — дополненная реальность», скоростной доступ в интернет, исправная чистая камера, хорошее освещение. Приложение должно работать на устройствах под управлением iOS версии 9.0 и выше, Android версии 5.0 и выше; требования к оперативной памяти: 2 гигабайта; OpenGL 3.0 (работа на устройствах с предыдущими версиями операционных систем и с более низкими параметрами оперативной памяти и OpenGL не гарантируется).

1. Установите приложение «AIV — дополненная реальность» через App Store или Google Play. (Для поиска введите название «AIV — дополненная реальность».)
2. Запустите приложение. Выберите учебное пособие «Физика. 10 класс» из списка.
3. Скачайте контент для книги на свой гаджет.
4. Откройте книгу.
5. Наведите камеру на иллюстрацию с символом так, чтобы изображение полностью поместилось на экране.
6. Приложение автоматически распознает изображение и воспроизведёт контент дополненной реальности.

Актуальная инструкция по использованию приложения размещена по адресу: aiv.by/ag.





Молекулярная физика — раздел физики, в котором изучают свойства тел и происходящие в них процессы, связанные с огромным числом частиц, содержащихся в этих тела.

В основе молекулярной физики лежит *молекулярно-кинетическая теория*, объясняющая свойства тел в зависимости от их строения, сил взаимодействия между частицами, из которых состоят тела, характера движения этих частиц. *Термодинамика* изучает способы и формы передачи энергии от одного тела к другому, закономерности превращения одних видов энергии в другие.

Применяя законы молекулярной физики и термодинамики, конструируют тепловые двигатели, холодильные аппараты, установки для сжижения газов (рис. 1) 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 и термодинамике оказывают влияние на развитие химии и биологии. Например, возникшая на стыке наук молекулярная биология объясняет явления, происходящие в живых организмах.

В 9-м классе, изучая механику, вы рассматривали механическую форму движения материи, т. е. перемещение тел относительно друг друга и их взаимодействие. При этом внутреннее строение того или иного тела не имело значения.



Рис. 1



Рис. 2

В молекулярной физике и термодинамике 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. 2) — 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 пространстве, может быть описано с использованием законов динамики одним векторным уравнением или его проекциями на координатные оси. Однако применить законы Ньютона ко всем молекулам, число которых в любом макроскопическом теле огромно, не реально. Пользуясь законами динамики для нахождения характеристик макроскопического тела, например воздуха в объёме 1 см³, понадобилось бы решить приблизительно $8 \cdot 10^{19}$ уравнений движения частиц.

Для описания макроскопической системы, например газа в сосуде, можно использовать любой из двух методов — молекулярно-кинетический (статистический) или термодинамический. Эти методы качественно различны, но взаимно дополняют друг друга. Первый лежит в основе молекулярной физики, второй — термодинамики.

При *молекулярно-кинетическом* описании используют средние значения физических величин, характеризующих поведение частиц, образующих систему. Например, среднюю кинетическую энергию и среднюю квадратичную скорость теплового (беспорядочного) движения частиц.

При *термодинамическом* описании используют физические величины, характеризующие систему в целом. Например, давление, объём, температуру системы.

ГЛАВА 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?

Представление о том, что все тела состоят из мельчайших частиц — атомов, возникло ещё в глубокой древности, и его достаточно отчётливо сформулировали древнегреческие философы Левкипп (приблизительно 500–440 до н. э.) и Демокрит (460–371 до н. э.). Однако в дальнейшем атомистические взгляды были забыты. Только во второй половине XVII в. английский учёный Р. Бойль в книге «Химик-скептик» придал понятию «химический элемент» новый смысл, близкий к современному. Затем в XVIII–XIX вв. М. В. Ломоносов, Д. Дальтон, А. Крёниг, Л. Больцман, Д. Максвелл и другие учёные разрабатывали и совершенствовали атомистические взгляды в качестве научной теории, получившей название классической молекулярно-кинетической теории.

В основе молекулярно-кинетической теории лежат три положения:

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

Дискретное строение вещества. Как вы уже знаете, реальность существования молекул подтверждают экспериментальные факты. Например, растворение веществ в воде и в других растворителях, механическое дробление вещества (рис. 3), сжатие



Рис. 3



Рис. 4

и расширение всех тел и особенно газов, диффузия, броуновское движение и многое другое.

Вещество имеет дискретное строение, т. е. состоит из отдельных частиц (молекул, атомов, ионов). Глаз может различить две точки, если расстояние между ними не менее 0,1 мм. Благодаря современным оптическим микроскопам можно различать структуры с расстоянием между элементами порядка 200 нм и более. Они позволяют наблюдать и фотографировать очень большие молекулы, состоящие из сотен и даже тысяч атомов (молекулы некоторых витаминов, гормонов и белков). На рисунке 4 представлена фотография молекулы нуклеиновой кислоты нитевидной формы, общая длина которой 34 мкм.

Использование электронных микроскопов позволяет наблюдать и фотографировать атомарные структуры.

От теории к практике

Расстояние между центрами соседних атомов золота $r = 2,90 \cdot 10^{-10}$ м. Какое число атомов определяет толщину листочка золота, числовое значение которой $d = 0,210$ мкм?

Из истории физики

4 марта 1981 г. немецкий учёный Герд Бинниг и швейцарский учёный Генрих Рорер впервые в мире наблюдали отдельные атомы на поверхности кремния с помощью туннельного микроскопа (рис. 5). За разработку и создание электронного микроскопа (рис. 6, а) немецкому учёному Эрнсту Руске и за изобретение сканирующего туннельного микроскопа (рис. 6, б) Г. Биннигу и Г. Рореру присуждена Нобелевская премия по физике за 1986 г.

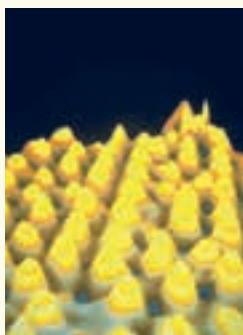


Рис. 5



а



б

Рис. 6

Тепловое движение частиц вещества. Молекулы, атомы и другие частицы, образующие вещество, находятся в непрерывном *тепловом движении*.

Тепловое движение — беспорядочное движение частиц вещества, интенсивность которого зависит от температуры тела.

В 1827 г. английский ботаник Роберт Броун (1773–1858), наблюдая в микроскоп взвесь цветочной пыльцы в воде, обнаружил, что частицы взвеси непрерывно двигались, описывая весьма причудливые траектории. Это движение частиц, признанное экспериментальным подтверждением теплового движения частиц вещества, назвали *бруновским движением*.

Бруновское движение — беспорядочное движение взвешенных* в жидкости или газе мельчайших нерастворимых твёрдых частиц размерами порядка 1 мкм и меньше.

Бруновские частицы движутся непрерывно и беспорядочно, а траектории их движений очень сложны. На рисунке 7 изображена упрощённая траектория движения бруновской частицы. Точкими отмечены положения частицы через одинаковые промежутки времени. Траектория движения в течение каждого промежутка времени заменена отрезком прямой, который представляет собой модуль результирующего перемещения частицы.

Бруновское движение обусловлено свойствами жидкости или газа. Оно не зависит от природы вещества бруновской частицы и внешних воздействий (кроме температуры). Причиной бруновского движения является тепловое движение частиц среды, окружающих бруновскую частицу, и отсутствие точной компенсации ударов, испытываемых частицей со стороны окружающих её молекул (атомов или ионов) (рис. 8).

Чем меньше размеры и масса бруновской частицы, тем заметнее становятся изменения её импульса под воздействием ударов.

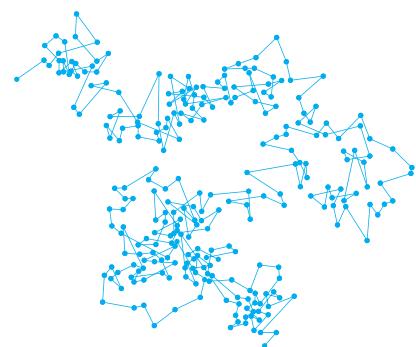


Рис. 7

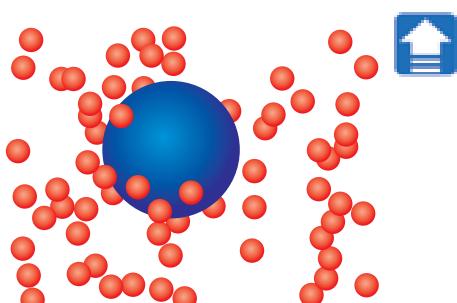


Рис. 8

* Взвешенные частицы — это частицы с плотностью вещества, сравнимой с плотностью среды (жидкости или газа), в которой они находятся, распределившиеся определённым образом по всему объёму этой среды.

Интенсивность движения броуновских частиц растёт с повышением температуры и уменьшением вязкости среды. Броуновское движение едва удаётся подметить в глицерине, а в газах оно, напротив, чрезвычайно интенсивно.

От теории к практике

1. Можно ли считать броуновским беспорядочное движение пылинок в воздухе (рис. 9)?
2. При рассмотрении в микроскопе капли крови можно увидеть на фоне бесцветной жидкости красные кровяные тельца, которые непрерывно и беспорядочно движутся (рис. 10). Как объяснить это явление?



Рис. 9

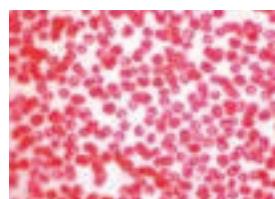


Рис. 10

Из истории физики

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 учёными теории явилось заслугой французского физика Жана Перрена (1870–1942). «За доказательство существования молекул» Ж. Перрену присуждена Нобелевская премия по физике за 1926 г.

Ещё одним подтверждением теплового движения частиц (молекул, атомов или ионов) вещества является *диффузия* (лат. *diffusio* — распространение, растекание, рассеивание).

Диффузия — процесс взаимного проникновения частиц соприкасающихся веществ между частицами другого вещества вследствие их теплового движения.

Если частицы соприкасающихся веществ распределены в пространстве неоднородно, то данный процесс приводит к самопроизвольному выравниванию их концентраций.

Концентрация частиц — физическая величина, численно равная числу частиц, содержащихся в единичном объёме:

$$n = \frac{N}{V}.$$

Если в разных частях одного и того же тела концентрации частиц не совпадают, то вследствие их теплового движения при постоянной температуре и отсутствии внешних сил происходит упорядоченное перемещение. Оно приводит к выравниванию концентраций (рис. 11).

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 диффузионному насыщению углеродом. Диффузию используют в ядерных технологиях как один из способов обогащения урана.

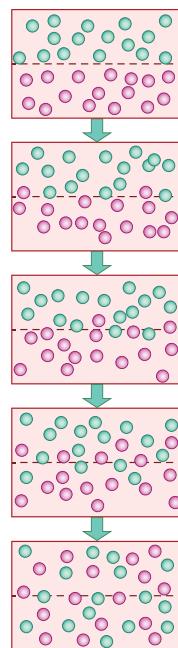


Рис. 11

От теории к практике

Что общего у броуновского движения и диффузии? Чем они различаются?

Интересно знать

Впервые воочию убедиться, что диффузия происходит не только в газах и жидкостях, но и в твёрдых телах, удалось в 1896 г. английскому металлургу Роберту Аустену. Он прижал друг к другу золотой диск и свинцовую цилиндр и поместил их на 10 суток в печь, в которой поддерживалась температура 200 °C. Когда печь открыли и извлекли из неё диск и цилиндр, оказалось, что их невозможно разъединить. Диффузия привела к тому, что золото и свинец буквально «проросли» друг в друга. В настоящее время такая технология соединения деталей хорошо изучена и получила название диффузионной сварки.

Взаимодействие частиц вещества. Факт существования твёрдых и жидких тел подтверждает, что между частицами веществ, образующих эти тела, действуют силы взаимного притяжения. Именно этими силами частицы (молекулы, атомы или ионы) в телахдерживаются вместе.

Из повседневного опыта известно, что силы взаимного притяжения нагляднее всего проявляются в твёрдых телах. Тонкий стальной трос диаметром 2 мм достаточно прочен, чтобы удержать на весу гирю, масса которой 150 кг.

То, что газы занимают весь предоставленный им объём, указывает на весьма незначительное проявление сил взаимного притяжения между их молекулами*. Причина в том, что усреднённое расстояние между молекулами газов существенно превышает размеры самих молекул, а также расстояния между центрами соседних частиц жидкости и твёрдых тел.

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.



Основные положения молекулярно-кинетической теории

Вещество имеет дискретное строение (состоит из микроскопических частиц)

Частицы вещества беспорядочно движутся

Частицы вещества взаимодействуют между собой



1. В одном из учебников, изданном в 1885 г., можно прочитать: «Твёрдый атом... живёт в виде невероятной, но всё ещё неопровергнутой гипотезы... Однако несравненно правдоподобнее теория, по которой материя... непрерывна, то есть не состоит из частиц с промежутками». Какие аргументы вы можете привести автору этих строк, чтобы доказать существование мельчайших частиц вещества?
2. Представьте себе, что ваш друг скептически относится к атомам и молекулам и полагает, что броуновское движение не является доказательством их существования. Он считает, что движение взвешенных в жидкости или газе частиц может быть также

* 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».

хорошо объяснено движением потоков воздуха или жидкости, их окружающих. Какие аргументы вы можете привести против такой интерпретации экспериментальных наблюдений (рис. 12)?



Рис. 12

3. Почему броуновское движение заметно лишь у частиц с малыми размерами ($d \leq 1 \text{ мкм}$) и массой?
4. Почему стеклянную хорошо притёртую пробку трудно вынуть из горлышка стеклянного флакона?
5. Дополните схему в кратких выводах, добавив опытные обоснования основных положений молекулярно-кинетической теории.



§ 2. Масса и размеры молекул. Количество вещества

В $1,0 \text{ см}^3$ любого газа, находящегося при нормальных условиях (температура $t_0 = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$, давление $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$), содержится $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул. Чтобы представить, насколько велико это число, предположим, что из отверстия в ампуле вместимостью $V = 1,0 \text{ см}^3$ ежесекундно вылетает 100 молекул. Тогда, для того чтобы все молекулы вылетели из ампулы, потребуется 8,6 млрд 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 определить число атомов в любом макроскопическом теле?

Молекулярно-кинетическая теория предоставляет 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 диаметр 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 атомов и 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 (или атома), выраженную в атомных единицах массы, называют *относительной молекулярной массой* M_r (или *относительной атомной массой* A_r). Относительная молекулярная (или атомная) масса M_r показывает, во сколько раз масса m_0 молекулы (или атома) больше атомной единицы массы:

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

В периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева (см. форзац 2) возле символов элементов указаны и их относительные атомные массы. В большинстве случаев при проведении расчётов значение относительной атомной массы округляют до целого числа, используя правила приближённых вычислений. Так, например, относительная атомная масса водорода равна 1, кислорода — 16, азота — 14.

Количество вещества, содержащегося в макроскопическом теле, определяют числом частиц в нём. Приведённые выше примеры показывают, насколько велико это число. Поэтому при расчётах принято использовать не абсолютное число частиц вещества, а относительное:

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

т. е. *количество вещества* ν определяют отношением числа частиц N этого вещества к постоянной Авогадро N_A .

Основной единицей количества вещества в СИ является 1 моль (моль). 1 моль равен количеству вещества, содержащему столько же частиц, сколько

атомов содержится в 0,012 кг изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$. Значит, в одном моле любого вещества находится одинаковое число атомов или молекул. Это число частиц обозначили N_A и назвали *постоянной Авогадро* в честь итальянского учёного Амедео Авогадро (1776–1856). Постоянная Авогадро 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 (или атомной) массой используют *молярную массу* M — массу вещества, взятого в количестве $v = 1$ моль. Молярную массу M определяют отношением массы m вещества к его количеству v :

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

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 массой следующим соотношением:

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

Молярную массу вещества также можно вычислить по формуле

$$M = m_0 N_A.$$

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

$$N = \frac{m}{m_0} = \frac{m}{M} N_A.$$

От теории к практике

1. Во сколько раз число молекул водорода, взятого в количестве $v_B = 8$ моль, больше числа молекул азота, количество вещества которого $v_a = 4$ моль?

2. Используя выражение $N = \frac{m}{M} N_A$, рассчитайте число молекул в одном грамме воды и убедитесь в справедливости приведённого в начале параграфа значения.



Формула	Физические величины, входящие в формулу	Единицы физических величин
$v = \frac{N}{N_A}$	v — количество вещества N — число частиц вещества N_A — постоянная Авогадро	МОЛЬ — моль ⁻¹
$M = \frac{m}{v}$	M — молярная масса	$\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
$m_0 = \frac{M}{N_A}$	m — масса вещества m_0 — масса молекулы вещества	кг кг
$N = \frac{m}{M} N_A$	$N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹	



1. В каких единицах измеряют массы атомов и молекул?
2. Что такое количество вещества? Назовите единицу этой физической величины.
3. Что такое постоянная Авогадро?
4. Что называют молярной массой вещества?
5. Объясните, почему количество вещества v , его масса m и молярная масса M связаны соотношением $v = \frac{m}{M}$.



Домашняя лаборатория

1. Предложите способ определения примерного числа молекул, испарившихся с каждого квадратного сантиметра поверхности воды, налитой в стакан, за промежуток времени $\Delta t = 1$ с.

Оборудование: стакан с водой, электронные весы (как можно с большей точностью измерения), секундомер, линейка.

2. Предложите способ определения числа частиц в кусочке мела (CaCO_3).

Оборудование: кусочек мела, электронные весы.

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

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

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

Пример 2. Определите количество вещества и число атомов, содержащихся в железном бруске объёмом $V = 100 \text{ см}^3$. Плотность железа $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Дано:

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

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

v — ?

N — ?

Решение. Количество вещества можно определить, воспользовавшись формулой $v = \frac{m}{M}$, где m — масса железного бруска, а $M = 56 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ — молярная масса

железа. Поскольку $m = \rho V$, то $v = \frac{\rho V}{M}$.

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

Число атомов в данном железном бруске $N = v N_A$.

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

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

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

Упражнение 1

- Определите молярные массы и массы молекул: а) воды H_2O ; б) углекислого газа CO_2 ; в) аммиака NH_3 ; г) азотной кислоты HNO_3 .
- В стакан налила вода H_2O массой $m = 0,20 \text{ кг}$. Определите количество вещества и число молекул воды в стакане.
- Определите массу $N = 4,5 \cdot 10^{22}$ молекул сероводорода H_2S .
- 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 $\rho_m = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
- В серебряной пластинке $N = 1,0 \cdot 10^{24}$ атомов. Определите объём пластиинки, если плотность серебра $\rho = 10,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.
- 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 объёмом $V = 8,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3$ и 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 диаметр молекулы оливкового масла, приняв толщину плёнки равной длине цилиндрических по форме молекул масла (рис. 13). Молярную массу оливкового масла примите $M = 0,28 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

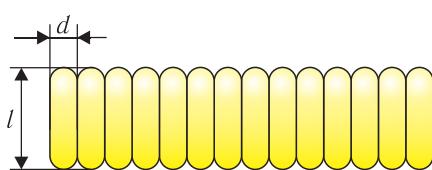


Рис. 13

$S = 0,55 \text{ м}^2$. Определите по этим данным массу и диаметр молекулы оливкового масла, приняв толщину плёнки равной длине цилиндрических по форме молекул масла (рис. 13). Молярную массу оливкового масла примите $M = 0,28 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.

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



§ 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).

Макро- и микропараметры. При изучении механики в 9-м классе вы познакомились с понятием «состояние механической системы тел». Параметрами этого состояния являются координаты, скорости или импульсы тел. В тепловых процессах основными физическими величинами, характеризующими состояние макроскопических тел без учёта их молекулярного строения, являются давление p , объём V и температура T . Эти физические величины называют *макроскопическими параметрами* состояния. К *микроскопическим параметрам* состояния тел относят индивидуальные характеристики молекул: массу отдельной молекулы m_0 , скорость \vec{v} , импульс \vec{p} и кинетическую энергию E_k её теплового движения.

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*.

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 их взаимодействия равна нулю); силы действуют только во время столкновений молекул, причём это силы отталкивания.

Поведение молекул идеального газа можно описать, используя законы Ньютона и учитывая, что между соударениями молекулы движутся практически равномерно и прямолинейно.

Модель идеального газа можно использовать в ограниченном 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.

Изучая физику в 7-м классе, вы узнали, 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. 14). Вследствие

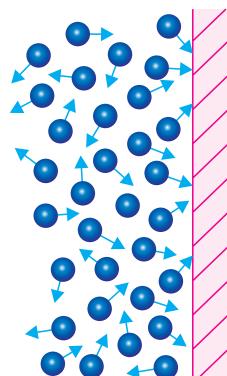


Рис. 14



хаотичности их движения усреднённое по времени давление газа в любой части сосуда одинаково, и его можно определить по формуле

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v^2 \rangle. \quad (3.1)$$

Выражение (3.1) называют *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*. Это уравнение позволяет рассчитать макроскопический параметр давление p идеального газа через массу m_0 молекулы, концентрацию n молекул и среднюю квадратичную скорость их теплового движения, определяемую по формуле $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$. Формула (3.1) связывает между собой макро- и микроскопические параметры системы «идеальный газ».



Зависимость давления газа от среднего значения квадрата скорости $\langle v^2 \rangle$ теплового движения его молекул обусловлена 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.

От теории к практике

В герметически закрытом сосуде находится идеальный газ. Если часть газа через клапан выпустить из сосуда, то как изменятся: а) давление газа; б) плотность газа; в) количество вещества в сосуде?

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

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_{\text{k}} \rangle. \quad (3.2)$$

Из выражения (3.2) следует, что давление идеального газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения его молекул и их концентрации.

От теории к практике

На рисунке 15 представлены графики зависимости давления от концентрации для двух идеальных газов, температуры которых различны. Во сколько раз отличаются средние кинетические энергии поступательного движения молекул этих газов?

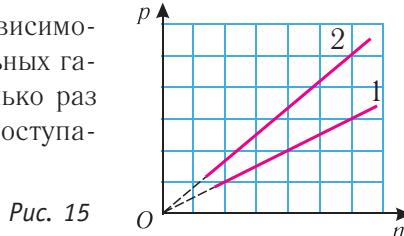


Рис. 15



Идеальный газ — модель газа, удовлетворяющая условиям

молекулы газа можно считать материальными точками, которые хаотически движутся

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

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

силы взаимодействия молекул идеального газа практически отсутствуют (потенциальная энергия их взаимодействия равна нулю); силы действуют только во время столкновений молекул, причём это силы отталкивания

$$\langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$$

$$p = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle$$



1. Назовите существенные признаки понятия «идеальный газ».
2. Каков механизм возникновения давления газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
3. От чего зависит давление идеального газа?
4. В таблице указаны плотности газов при нормальных условиях:

Газ	водород	кислород	азот	хлор
Плотность газа ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	0,090	1,43	1,25	3,21

У молекул какого газа средняя квадратичная скорость поступательного движения максимальна?

5. В двух сосудах находятся одинаковые числа молекул идеального газа. В каком случае давления газа в сосудах будут одинаковы?



Примеры решения задач

Пример 1. Баллон электрической лампы наполнен 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:
 $\rho = 0,90 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$$\begin{aligned} p_1 &= 90 \text{ кПа} = \\ &= 9,0 \cdot 10^4 \text{ Па} \\ p_2 &= 150 \text{ кПа} = \\ &= 1,50 \cdot 10^5 \text{ Па} \end{aligned}$$

$$\Delta \langle v^2 \rangle = ?$$

Решение. Покажем, что между плотностью ρ газа и концентрацией n его частиц существует связь. Плотность вещества газа равна отношению массы к представленному ему объёму. Поскольку произведение массы одной молекулы m_0 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: $p = \frac{1}{3} \rho \langle v^2 \rangle$. Следовательно, средний квадрат скорости теплового движения молекул газа $\langle v^2 \rangle = \frac{3p}{\rho}$. Определим изменение среднего квадрата скорости теплового движения молекул газа после включения лампы:

$$\Delta \langle v^2 \rangle = \frac{3p_2}{\rho} - \frac{3p_1}{\rho} = \frac{3}{\rho} (p_2 - p_1).$$

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

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

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

Дано:

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

$$p = 6,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$v = 2,0 \text{ моль}$$

$$\langle E_k \rangle = ?$$

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 $n = \frac{N}{V}$,

а число атомов газа

$$N = vN_A, \text{ то } \langle E_k \rangle = \frac{3p}{2n} = \frac{3pV}{2N} = \frac{3pV}{2vN_A}.$$

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

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

Упражнение 2

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

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

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

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

6. Во сколько раз изменится давление идеального одноатомного газа, если средняя кинетическая энергия теплового движения его атомов увеличится в $\alpha = 3$ раза, а объём газа уменьшится в $\beta = 2$ раз?



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

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 неопределенности, необходимо установить способ измерения температуры.

Тепловое равновесие. Если привести в соприкосновение два тела, то молекулы этих тел, взаимодействуя между собой, будут обмениваться энергией. При этом молекулы с большей кинетической энергией передают часть энергии молекулам с меньшей кинетической энергией. В результате средняя кинетическая энергия теплового 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 одинаковой, следовательно, у тел одна и та же температура. Это учитывают при измерении температуры тела. Термометр приводят в соприкосновение с телом, но отсчёт его показаний выполняют не сразу, а через некоторый промежуток времени. Это необходимо для того, чтобы между термометром и телом установилось *тепловое равновесие*.

Тепловое равновесие — состояние изолированной физической системы, при котором все её макроскопические параметры остаются неизменными с течением 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 такую систему, всегда одинакова*.

От теории к практике

1. Температура воды в стакане $t = 18^\circ\text{C}$. Чему равна температура термометра, погружённого в воду?
2. Погруженный в стакан с водой лабораторный термометр вынули и поднесли к настольной лампе, чтобы лучше рассмотреть его показания. Корректно ли определена температура воды?

Интересно знать

Понятия «градус» и «температура» появились задолго до изобретения термометра. Знаменитый древнеримский врач Гален (II в.) считал, что все лекарства следует различать по «градусам» (от лат. *gradus* — ступень) теплоты, холода, сухости и влажности. Гален учил, что одни лекарства оказывают охлаждающее действие, а другие — согревающее. При необходимости следовало смешивать лекарства, чтобы умерить излишнее тепло влажностью, а холод — сухостью. От латинского слова *temperature* (смешение) возник термин «температура».



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. Необходимым свойством обладает *средняя кинетическая энергия теплового движения частиц вещества*. Термическое движение частиц вещества существенно изменяется при изменении его агрегатного состояния. Максимально простым оно оказывается у одноатомного газа, атомы которого совершают только поступательное движение.

Возьмём несколько сосудов разной вместимости, снабжённых манометрами для измерения давления (рис. 16). Заполнив их различными газами, например аргоном, неоном и гелием, поместим сначала в сосуд с тающим льдом ($t_0 = 0^\circ\text{C}$), а затем будем изменять температуру содержимого сосуда, пока она не станет равной температуре кипения воды ($t = 100^\circ\text{C}$).

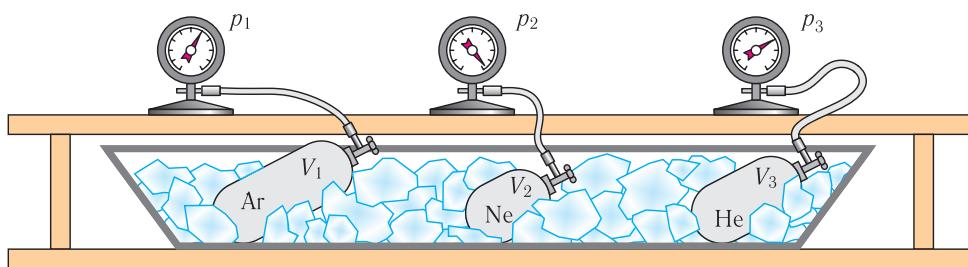


Рис. 16

Давления газов в сосудах могут отличаться. Массы газов можно определить взвешиванием откаченных и заполненных сосудов. Зная массу m газа и его молярную массу M , 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.

Опытным путём установлено, что в состоянии теплового равновесия, несмотря на различные значения давления p и концентрации n частиц, отношение давления к концентрации $\frac{p}{n}$ 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. В 1899 г. немецкий физик-теоретик Макс Планк (1858–1947) предложил назвать коэффициент k посторонней Больцмана в честь австрийского физика Людвига 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 *абсолютную температурную шкалу*, то при определении числового значения температуры по этой шкале полагают:

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

Абсолютную (термодинамическую) шкалу 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*.

Шкала Кельвина совершенно не зависит от физических свойств каких бы то ни было веществ, поэтому её можно считать абсолютной и универсальной.

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: $T = t + 273,15$.

* Единица измерения температуры джоуль неудобна. Например, температура кипения воды, выраженная в джоулях: $\Theta = \frac{p}{n} = 5,15 \cdot 10^{-21}$ Дж.

Единица температуры по абсолютной шкале один кельвин (1 K) 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. 17).

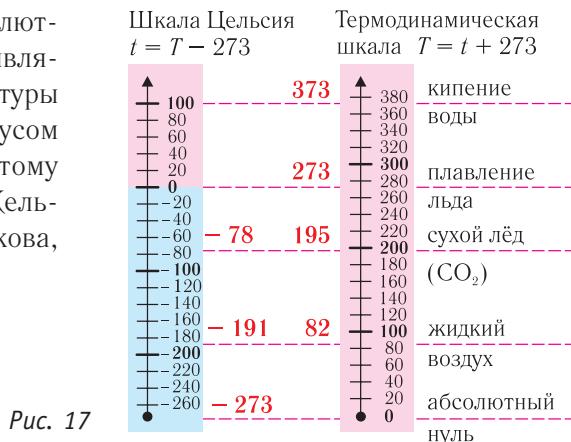


Рис. 17

От теории к практике

Выразите по шкале Кельвина температуру тела здорового человека.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа (3.2) следует: $\frac{p}{n} = \frac{2}{3} \langle E_k \rangle$. Таким образом, учитывая выражение (4.1), можно записать: $\frac{2}{3} \langle E_k \rangle = kT$ или

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

Соотношение (4.2) устанавливает связь между абсолютной температурой T идеального газа и средней кинетической энергией $\langle E_k \rangle$ поступательного движения его частиц. Таким образом, из формулы (4.2) следует, что *средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц идеального газа пропорциональна его абсолютной температуре*.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газов, находящихся в состоянии теплового равновесия, одинакова для разных газов и не зависит от массы молекулы газа.

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 (4.1) основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа может быть записано в виде:

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

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

От теории к практике

- В состав воздуха у земной поверхности в небольшом количестве входят инертные газы: неон ($M_{\text{Ne}} = 20 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$) и гелий ($M_{\text{He}} = 4,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$). Какова средняя кинетическая энергия теплового движения частиц этих газов при нормальных условиях: $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $t_0 = 0,0^\circ\text{C}$? Какие данные из условия можно исключить?
- Совпадают ли средние квадратичные скорости молекул кислорода и азота в воздухе?



Тепловое равновесие — 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

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

$$\frac{p}{n} = kT$$

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

Абсолютная температура
 $T = (t + 273,15) \text{ К}$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения частиц газа

$$\langle E_{\text{к}} \rangle = \frac{3}{2} kT$$

$$\langle E_{\text{к}} \rangle = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2}$$

Средняя квадратичная скорость теплового движения частиц газа

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$



1. Какая величина характеризует состояние теплового равновесия?
2. Можно ли обычным жидкостным термометром измерить температуру капли воды?
3. Как зависит средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа от температуры?
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 абсолютной температурой и концентрацией молекул?

Домашняя лаборатория

В одном из углов комнаты разбрьзгайте духи или одеколон. Через некоторый промежуток времени запах распространится по всей комнате. Используя часы с секундной стрелкой, определите среднюю скорость распространения молекул духов (одеколона). Как согласовать полученный результат с достаточно большим значением средней квадратичной скорости поступательного движения молекул газов?

Примеры решения задач

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

Дано:

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

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

$$T_1 = T_2 = T$$

$$\frac{\langle v_{\text{кв}1} \rangle}{\langle v_{\text{кв}2} \rangle} = ?$$

Решение. Средняя квадратичная скорость теплового движения частиц газа $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$. Поскольку масса одной молекулы вещества $m_0 = \frac{M}{N_A}$, то $\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M}}$. Так как газы находятся в состоянии теплового равновесия, т. е. $T_1 = T_2 = T$, то средние квадратичные скорости атомов гелия

$$\langle v_{\text{кв}1} \rangle = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M_1}},$$

$$\text{молекул кислорода} — \langle v_{\text{кв}2} \rangle = \sqrt{\frac{3N_A kT}{M_2}}.$$

Тогда:

$$\frac{\langle v_{\text{кв}1} \rangle}{\langle v_{\text{кв}2} \rangle} = \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = \sqrt{\frac{32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}{4,0 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}} = 2\sqrt{2} = 2,8.$$

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 $V = 14 \text{ л}$ находился газ, абсолютная температура которого $T = 290 \text{ К}$. 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

$$p_1 = n_1 kT = \frac{N_1}{V} kT.$$

После того как израсходовали часть газа, а его температура увеличилась до первоначального значения T , давление газа стало

$$p_2 = n_2 kT = \frac{N_2}{V} kT.$$

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: $p_1 - p_2 = 2,9 \text{ кПа}$.

Упражнение 3

1. Температура куска льда по шкале Цельсия $t = -53,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Чему равна его температура по шкале Кельвина?

2. Температура газа по абсолютной шкале: а) $T = 473 \text{ К}$; б) $T = 120 \text{ К}$. Чему равна температура газа по шкале Цельсия в каждом случае?

3. Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения частиц идеального газа, температура которого $t = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

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

5. Водород, абсолютная температура которого $T = 290$ К, а масса $m = 2,0$ кг, находится в сосуде вместимостью $V = 2,0$ м³. 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 $\alpha = 2,00$ раз?

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



§ 5. Уравнение состояния идеального газа

Выясним, как связаны между собой макроскопические параметры идеального газа, которые характеризуют его равновесное состояние: давление, масса всего газа, объём, предоставленный ему, и температура.

Состояние макроскопической системы полностью определено, если известны её макроскопические параметры — давление p , масса m , температура T и объём V . Уравнение, связывающее параметры данного состояния, называют *уравнением состояния системы*. Изменение 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:

$$p_1 V_1 = N k T_1, \quad p_2 V_2 = N k T_2, \quad (5.1)$$

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

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

или

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (5.2)$$

При неизменных массе и молярной массе идеального газа отношение произведения его давления и объёма к абсолютной температуре является величиной постоянной.

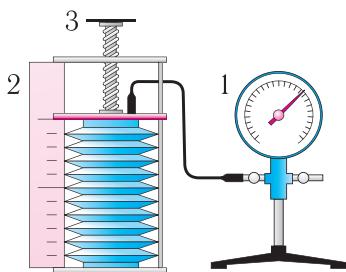


Рис. 18

результатом измерения давления газа в сосуде, изображённом на рисунке 18, является соединение изотермического и изобарного измерений. Изотермическое измерение давления газа в сосуде проводят с помощью манометра 1, соединённого с герметичным гофрированным сосудом, регистрирующим давление газа внутри сосуда. Объём газа в сосуде можно рассчитать, используя линейку 2. Температура газа в сосуде равна температуре окружающей среды и может быть измерена термометром.

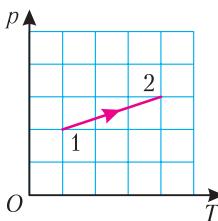
Измерив параметры газа p_1 , V_1 , T_1 в начальном состоянии, вычисляют отношение $\frac{p_1 V_1}{T_1}$. Затем помещают сосуд в горячую воду. При этом температура газа и его давление изменяются. Вращая винт 3, изменяют вместимость сосуда. Измерив снова давление газа p_2 и температуру T_2 , а также рассчитав предоставленный ему объём V_2 , вычисляют отношение $\frac{p_2 V_2}{T_2}$. Как показывают расчёты, уравнение состояния (5.2) выполняется в пределах погрешности эксперимента.

Уравнение состояния (5.2) можно применять для газов при следующих условиях:

- 1) не очень большие давления (пока собственный объём всех молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с предоставленным ему объёмом);

- 2) не слишком низкие или же высокие температуры (пока абсолютное значение потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия пренебрежимо мало по сравнению с кинетической энергией теплового движения молекул).

От теории к практике



На рисунке 19 представлен график процесса перехода идеального газа данной массы из состояния 1 в состояние 2. Как изменился объём газа в результате этого процесса?

Рис. 19

Поскольку число частиц $N = \frac{m}{M} N_A$, то из уравнения (5.1) следует:

$$pV = kN_A \frac{m}{M} T. \quad (5.3)$$

Величину, равную произведению постоянной Больцмана k и постоянной Авогадро N_A , назвали *универсальной газовой постоянной* R :

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \quad (5.4)$$

С учётом выражения (5.4) уравнение (5.3) примет вид:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (5.5)$$

Поскольку количество вещества $v = \frac{m}{M}$, то формулу (5.5) можно записать в виде:

$$pV = vRT.$$

Уравнение состояния в виде (5.5) впервые получил русский учёный Д. И. Менделеев (1834–1907) в 1874 г., поэтому его называют *уравнением Клапейрона–Менделеева*.

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

Давление смеси газов. В повседневной жизни часто приходится иметь дело не с газом, состоящим из одинаковых молекул, а со смесью нескольких разнородных газов, не вступающих в химические реакции при рассматриваемых условиях. Например, воздух в комнате является смесью азота, кислорода, инертных газов и водорода, а также некоторых других газов.

Вследствие теплового движения частиц каждого газа, входящего в состав газовой смеси, они равномерно распределяются по всему предоставленному смеси объёму. Столкновения частиц обеспечивают в смеси тепловое равновесие.

Каждый газ вносит свой вклад в суммарное давление, производимое газовой смесью, создавая давление, называемое *парциальным*.

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

Смесь идеальных газов принимают за идеальный газ.



Из истории физики

Фундаментальные исследования газовых смесей провёл английский учёный Джон Дальтон (1766–1844). Им сформулирован закон независимости парциальных давлений компонентов смеси (1801–1802). В 1802 г. на несколько месяцев раньше французского учёного Жозефа Гей-Люссака (1778–1850) Дальтон установил закон теплового расширения газов, а также ввёл понятие атомного веса.



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

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



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



1. Что называют уравнением состояния идеального газа?
2. Как связаны параметры идеального газа в уравнении состояния?
3. Какое давление называют парциальным?



Пример решения задачи

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

Дано:

$$\begin{aligned} p_1 &= 2,84 \text{ МПа} = \\ &= 2,84 \cdot 10^6 \text{ Па} \\ T_1 &= 280 \text{ К,} \\ T_2 &= 300 \text{ К} \\ p_2 &= 1,52 \text{ МПа} = \\ &= 1,52 \cdot 10^6 \text{ Па} \end{aligned}$$

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

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

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} RT_1, \quad p_2 V = \frac{m_2}{M} RT_2,$$

откуда

$$m_1 = \frac{p_1 VM}{RT_1}, \quad m_2 = \frac{p_2 VM}{RT_2}.$$

Тогда

$$\frac{m_1 - m_2}{m_1} = \frac{\frac{VM}{R} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right)}{\frac{VMP_1}{RT_1}} = 1 - \frac{P_2 T_1}{P_1 T_2}.$$

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

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



Упражнение 4

1. Определите количество вещества идеального газа, находящегося в сосуде вместимостью $V = 480 \text{ см}^3$ при нормальных условиях (атмосферное давление $p_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$, температура $t_0 = 0,0^\circ\text{C}$).

2. На рисунке 20 представлен график зависимости давления водорода, масса которого $m = 100 \text{ г}$, от абсолютной температуры. Определите объём, занимаемый газом.

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 через некоторый промежуток времени оказалась такой же, как и до расширения.

4. 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 $\rho = 0,86 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

5. На рисунке 21 точки 1 и 2 соответствуют различным состояниям идеального газа определённой массы. Определите, во сколько раз отличаются давления газа в состояниях 1 и 2.

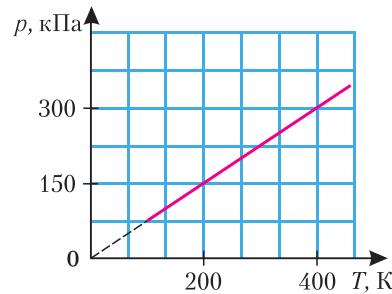


Рис. 20

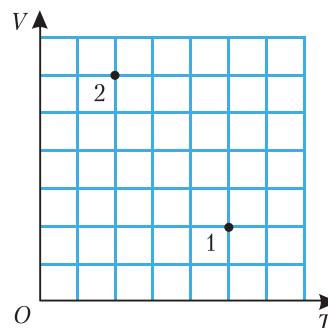


Рис. 21



§ 6. Изотермический, изобарный и изохорный процессы

Свойство газов существенно изменять предоставленный им объём широко используют в тепловых двигателях. Анализируя процессы, происходящие с газом в этих устройствах, важно знать, каким законам подчиняются газы и каковы условия применимости этих законов.

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

Изотермический процесс. Процесс изменения состояния физической системы при постоянной температуре ($T = \text{const}$) называют *изотермическим*.

Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса идеального газа не изменяются, то из уравнения Клапейрона–Менделеева следует:

$$pV = \frac{m}{M}RT = \text{const}, \text{ или } p = \frac{vRT}{V}, \text{ т. е. } p = \frac{\text{const}}{V}. \quad (6.1)$$

Давление данной массы газа при постоянных молярной массе и температуре обратно пропорционально его объёму.

Это утверждение называют *законом Бойля–Мариотта*.

Справедливость закона Бойля–Мариотта можно продемонстрировать экспериментально, используя установку, представленную на рисунке 18 в § 5.

Если медленно изменять объём газа, находящегося в сосуде, то вследствие теплообмена с окружающей средой можно поддерживать температуру газа в сосуде практически постоянной. При этом уменьшение объёма газа при вращении винта \mathcal{Z} повлечёт за собой увеличение его давления и некоторое незначительное увеличение температуры. И наоборот, увеличение объёма приведёт к уменьшению давления и некоторому незначительному уменьшению температуры газа*.

От теории к практике

- Почему пузырьки воздуха, находящиеся в жидкости, поднимаясь вверх, увеличиваются в объёме?
- Если, не отрываясь, выпить из пластиковой бутылки газированную воду, то можно обнаружить, что бутылка деформируется. Почему?

* Незначительное изменение температуры газа принципиально необходимо для теплообмена с термостатом — передача тепла возможна только при разных температурах тел.

График изотермического процесса, совершающегося идеальным газом, в координатах (p, V) представляет собой гиперболу (рис. 22). В физике такую кривую называют *изотермой*. Разным значениям температуры газа соответствуют разные изотермы. Согласно соотношениям (6.1) для одинаковых объёмов газов с одинаковыми количествами вещества и разными температурами чем больше давление, тем выше температура (рис. 22).

Многочисленные опыты показали, что исследованные газы подчиняются закону Бойля–Мариотта тем точнее, чем меньше их плотность. При значительном увеличении давления газа этот закон перестаёт выполняться.

От теории к практике

Изобразите графики изотермического процесса в координатах (p, T) и (V, T) .

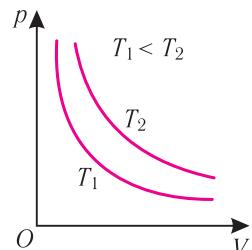


Рис. 22

Интересно знать

Лёгкие расположены в грудной клетке, объём которой при дыхании периодически изменяется благодаря работе межреберных мышц и диафрагмы. Когда грудная клетка расширяется, давление воздуха в лёгких становится меньше атмосферного, и воздух через воздухоносные пути устремляется в лёгкие — происходит вдох. При выдохе объём грудной клетки уменьшается, что вызывает уменьшение объёма лёгких. Давление воздуха в них становится выше атмосферного, и воздух из лёгких устремляется в окружающую среду.

Изобарный процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении ($p = \text{const}$) называют *изобарным*.

В 1802 г. французский учёный Жозеф Гей-Люссак (1778–1850) рассмотрел этот процесс для воздуха, водорода, кислорода и азота.

Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса газа не изменяются, то объём газа, как следует из уравнения Клапейрона–Менделеева:

$$V = \frac{mR}{pM}T \quad \text{или} \quad V = \frac{vR}{p}T, \quad \text{т. е.} \quad V = \text{const } T. \quad (6.2)$$

Объём данной массы газа при постоянных молярной массе и давлении прямо пропорционален абсолютной температуре.

Это утверждение называют *законом Гей-Люссака*.

Справедливость закона Гей-Люссака можно продемонстрировать экспериментально, используя установку, представленную на рисунке 23. Жидкость в сосуде находится в тепловом равновесии с тонкой трубкой, заполненной воздухом, запертым капелькой масла. При увеличении температуры жидкости объём воздуха, находящегося в трубке под капелькой масла, возрастает и капелька движется вверх. При уменьшении температуры объём воздуха уменьшается — и капелька движется вниз.

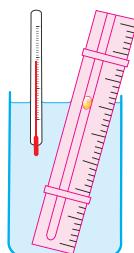


Рис. 23

От теории к практике

Можно ли считать расширение газа при медленном нагревании его в цилиндре с подвижным поршнем изобарным процессом?

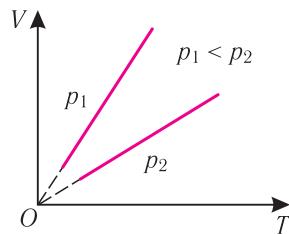


Рис. 24

Поскольку $V \sim T$, то в координатах (V, T) график изобарного процесса, совершаемого идеальным газом, представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 24). Этую линию называют *изобарой*.

Изобара реальных газов не может быть продлена до нулевого значения температуры (на графике пунктирная линия), потому что при низких температурах все газы существенно отличаются от модели «идеальный газ» и при дальнейшем уменьшении температуры превращаются в жидкости.

В одних и тех же координатах (V, T) можно построить несколько изobar, которые соответствуют разным давлениям данной массы идеального газа при неизменной молярной массе. Анализ соотношений (6.2) позволяет сделать вывод, что большему давлению соответствует меньший наклон изобары к оси температур (см. рис. 24).

От теории к практике

Изобразите графики изобарного процесса в координатах (p, V) и (p, T) .

Изохорный процесс. Процесс изменения состояния газа при постоянном объёме ($V = \text{const}$) называют *изохорным*.

Впервые этот процесс рассмотрел в 1787 г. французский учёный Жак Шарль (1746–1823)*.

* Несмотря на то что Шарль не опубликовал результаты своих исследований, история физики отдаёт приоритет открытия ему.

Если при переходе из начального состояния в конечное масса и молярная масса идеального газа не изменяются, то давление газа, как следует из уравнения Клапейрона–Менделеева:

$$p = \frac{mR}{VM} T \text{ или } p = \frac{vR}{V} T, \text{ т. е. } p = \text{const } T. \quad (6.3)$$

Давление данной массы газа при постоянных молярной массе и объёме прямо пропорционально абсолютной температуре.

Это утверждение называют *законом Шарля*.

Справедливость закона Шарля можно продемонстрировать экспериментально, используя установку, представленную на рисунке 25. Колба, наполненная воздухом и 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.

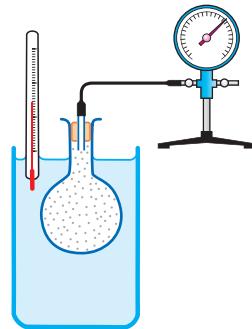


Рис. 25

От теории к практике

Идеальный газ определённой массы изохорно охлаждают так, что его температура уменьшается от $t_1 = 327^\circ\text{C}$ до $t_2 = 7^\circ\text{C}$. Во сколько раз уменьшается давление газа?

В координатах (p, T) график изохорного процесса, совершающегося идеальным газом, представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат (рис. 26). Эту линию называют *изохорой*.

Как и в случае изобарного процесса, изохора реальных газов не может быть продлена до нулевого значения температуры.

В одних и тех же координатах (p, T) можно построить несколько изохор, соответствующих разным объёмам данной массы газа при неизменной молярной массе. Анализ соотношений (6.3) показывает, что большему объёму соответствует меньший наклон изохоры к оси температур (см. рис. 26).

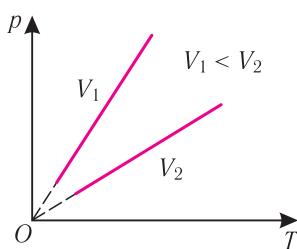


Рис. 26

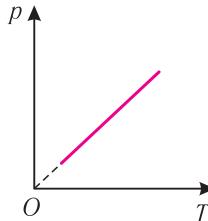
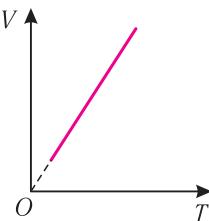
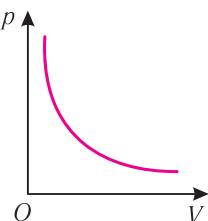
От теории к практике

Изобразите графики изохорного процесса в координатах (p, V) и (V, T) .



Процесс изменения состояния идеального газа данной массы при неизменной молярной массе

	изотермический	изобарный	изохорный
При постоянном макроскопическом параметре	$T = \text{const}$	$p = \text{const}$	$V = \text{const}$
Уравнение процесса	$p = \frac{\text{const}}{V}$, $p_1V_1 = p_2V_2$	$V = \text{const } T$, $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	$p = \text{const } T$, $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
Формулировка закона	Давление данной массы идеального газа при неизменных молярной массе и температуре обратно пропорционально его объёму	Объём данной массы идеального газа при неизменных молярной массе и давлении прямо пропорционален его абсолютной температуре	Давление данной массы идеального газа при неизменных молярной массе и объёме прямо пропорционально его абсолютной температуре





1. Как связаны давление и объём идеального газа при изотермическом процессе?
2. Как связаны объём и абсолютная температура идеального газа при изобарном процессе?
3. Как связаны давление и абсолютная температура идеального газа при изохорном процессе?
4. При выполнении каких условий справедлив каждый из законов изопроцессов в реальном газе?
5. Объём идеального газа определённой массы и неизменного химического состава изобарно увеличили в $b = 1,5$ раза, а затем давление газа изохорно уменьшили в $c = 3$ раза.
 - а) Как изменилась абсолютная температура газа в результате первого процесса?
 - б) Как изменилась абсолютная температура газа в результате второго процесса?
 - в) Во сколько раз начальная абсолютная температура газа отличается от его конечной температуры?
6. На рисунке 27 представлен график трёх процессов изменения состояния идеального газа определённой массы и неизменного химического состава.
 - а) Какому процессу соответствует участок $1 \rightarrow 2$ графика? Во сколько раз увеличилось давление газа в этом процессе?
 - б) Какому процессу соответствует участок $2 \rightarrow 3$ графика? Во сколько раз увеличились объём и абсолютная температура газа в этом процессе?
 - в) Какому процессу соответствует участок $3 \rightarrow 4$ графика? Как и во сколько раз изменились объём и давление газа в этом процессе?
 - г) Во сколько раз следует уменьшить температуру газа, чтобы изохорно перевести газ из состояния 4 в состояние 2?

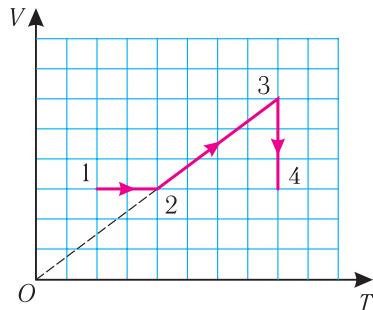


Рис. 27

Примеры решения задач

Пример 1. На рисунке 28 представлен график трёх процессов изменения состояния некоторой массы идеального газа. Как изменились параметры газа на участках $1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 1$? Изобразите эти процессы в координатах (p, V) и (p, T) .

Решение. На участке $1 \rightarrow 2$ объём газа прямо пропорционален абсолютной температуре, следовательно, процесс перехода газа из

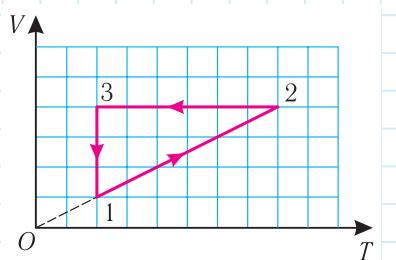


Рис. 28

состояния 1 в состояние 2 является изобарным. Из графика следует, что в состоянии 2 температура и объём газа больше в 4 раза, 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 $1 \rightarrow 2$: $p = \text{const}$, $V \uparrow$, $T \uparrow$, $V_2 = 4V_1$, $T_2 = 4T_1 \Rightarrow$
происходит изобарное нагревание газа.

В процессе перехода газа из состояния 2 в состояние 3 остаётся постоянным объём (процесс изохорный), а температура газа уменьшается в 4 раза. Из соотношения (6.3) следует, что при изохорном охлаждении давление газа уменьшается пропорционально его абсолютной температуре. Поэтому можно записать:

переход $2 \rightarrow 3$: $V = \text{const}$, $T \downarrow$, $p \downarrow$, $p_3 = \frac{T_3}{T_2} p_2 = \frac{1}{4} p_2 \Rightarrow$
происходит изохорное охлаждение газа.

Процесс перехода газа из состояния 3 в состояние 1 — изотермический. При этом объём газа уменьшается в 4 раза, что влечёт за собой, согласно закону Бойля–Мариотта, увеличение давления газа в 4 раза:

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

Опираясь на сделанные выводы, представим все три процесса в координатах (p, V) и (p, T) (рис. 29, а, б).

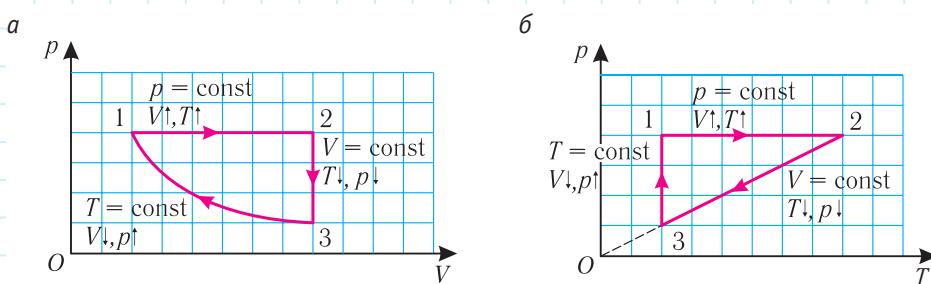


Рис. 29

Пример 2. При изотермическом расширении идеального газа определённой массы его объём увеличился от $V_1 = 2,0$ л до $V_2 = 5,0$ л, а давление уменьшилось на $\Delta p = -15$ кПа. Определите первоначальное давление газа.

Дано:

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

$$V_2 = 5,0 \text{ л} = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$\Delta p = -15 \text{ кПа} = -1,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

$$p_1 = ?$$

Откуда

Решение. Так как температура и масса газа не изменяются, то его начальное и конечное состояния связаны законом Бойля–Мариотта, т. е. $p_1 V_1 = p_2 V_2$. С учётом того, что $p_2 = p_1 + \Delta p$, получим:

$$p_1 V_1 = (p_1 + \Delta p) V_2.$$

$$p_1 = \frac{\Delta p V_2}{V_1 - V_2}.$$

$$p_1 = \frac{-1,5 \cdot 10^4 \text{ Па} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Па} = 25 \text{ кПа}.$$

Ответ: $p_1 = 25$ кПа.



Упражнение 5

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

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

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

4. На рисунке 30 представлен график изменения состояния определённой массы идеального газа. (Переход $3 \rightarrow 1$ осуществляется при неизменной температуре.) Изобразите графически этот процесс в координатах (T, V) и (p, T) .

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

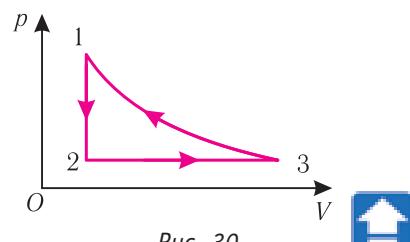


Рис. 30



Обобщение и систематизация знаний

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ

Вещество имеет дискретное строение
(состоит из микроскопических частиц)

Микропараметры

Масса молекулы $m_0 = \frac{M}{N_A}$,
скорость \vec{v} молекулы,
импульс \vec{p} молекулы,
кинетическая энергия E_k
теплового движения молекулы

Частицы вещества

Средняя
кинетическая
энергия
поступательного
движения молекул
 $\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT$

Основное уравнение
МКТ

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

Зависимость давления газа
от концентрации молекул
и температуры
 $p = nkT$

ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

беспорядочно движутся

Частицы вещества взаимодействуют между собой

Макропараметры

Средняя квадратичная скорость движения молекул газа

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$$

Давление Объём Температура

Уравнение состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{M}RT$$

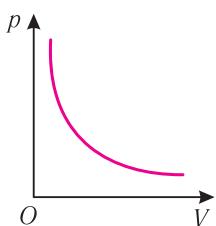
Уравнение Клапейрона, связывающее два любых состояния идеального газа при неизменных массе и его молярной

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2}$$

Изотермический процесс

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

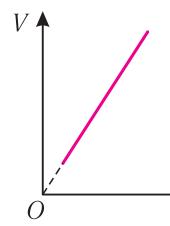
$$p_1V_1 = p_2V_2$$



Изобарный процесс

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

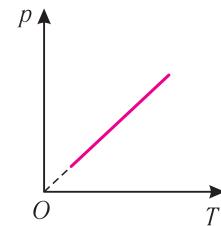
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$



Изохорный процесс

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

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$



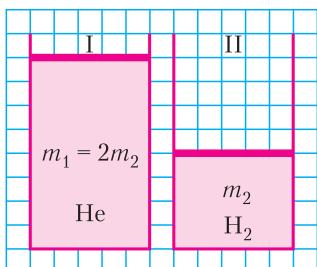


Рис. 31

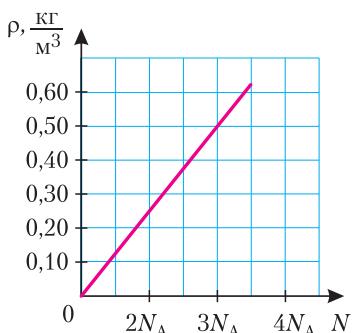


Рис. 32

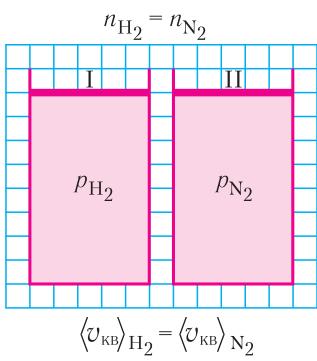


Рис. 33

Задания для самоконтроля

1. Определите отношение концентрации частиц во втором сосуде к концентрации частиц в первом сосуде (рис. 31).

2. На графике (рис. 32) представлена зависимость плотности водорода H_2 от числа его молекул в сосуде. Определите вместимость сосуда.

3. В сосуд с водой бросили кристаллик поваренной соли NaCl массой $m = 2,0$ мг. Спустя некоторый промежуток времени соль, растворившись, распределилась равномерно 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.

4. Концентрации молекул водорода и азота в сосудах и средние квадратичные скорости их движения одинаковые (рис. 33). Определите, во сколько раз давление азота больше давления водорода.

5. На рисунке 34 представлен график зависимости давления газа в баллоне газонаполненной электрической лампы от среднего квадрата скорости теплового движения его молекул. Определите плотность газа в баллоне лампы.

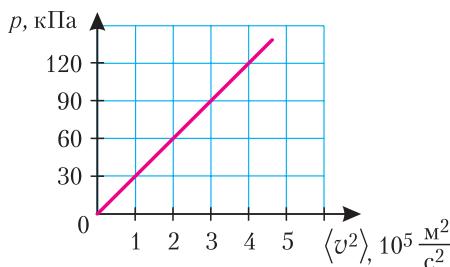


Рис. 34

6. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газов в обоих сосудах одинаковая и составляет $\langle E_k \rangle = 3,15 \cdot 10^{-21}$ Дж (рис. 35). Определите концентрацию газа в первом сосуде.

7. Давление гелия в сосуде $p = 0,36$ МПа, а его плотность $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Определите среднюю кинетическую энергию теплового движения атомов гелия.

8. При переходе из состояния 1 в состояние 2 средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа изменялась так, как представлено на графике (рис. 36). Определите температуру газа в состоянии 2.

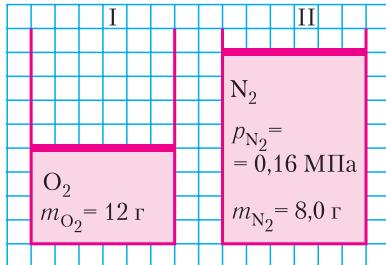


Рис. 35

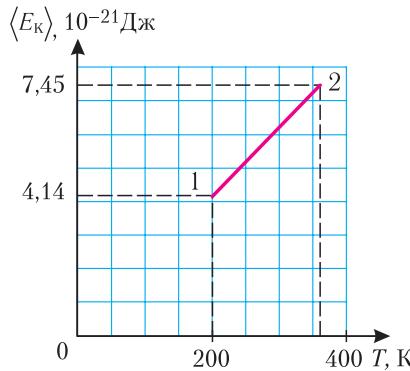


Рис. 36

9. Под поршнем в цилиндре находится идеальный газ. В таблице представлены некоторые параметры газа при переходе из начального состояния в конечное. Определите объём, предоставленный газу в конечном состоянии.

Состояние	Параметры газа		
	Давление	Абсолютная температура	Объём
Начальное	p_1	T_1	$V_1 = 2 \text{ л}$
Конечное	$p_2 = 4p_1$	$T_2 = 2T_1$	V_2

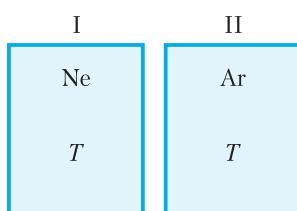


Рис. 37

10. Определите отношение $\frac{\langle v_{\text{квI}} \rangle}{\langle v_{\text{квII}} \rangle}$ средних квадратичных скоростей теплового движения атомов газов, находящихся в сосудах (рис. 37).

11. Кинетическая энергия теплового движения всех частиц идеального одноатомного газа, находящегося в герметично закрытом баллоне, $E_{\text{k}} = 12$ кДж. Определите давление газа, если вместимость баллона $V = 20$ л.

12. На рисунке 38 представлен график зависимости давления идеального газа, количество вещества которого $v = 10$ моль, от абсолютной температуры. Определите объём газа.

13. На рисунке 39 представлены графики зависимости давления идеального газа определённой массы от объёма при постоянных значениях T_1 и T_2 абсолютной температуры. Определите температуру T_2 газа, если температура $T_1 = 210$ К.

14. После изохорного нагревания идеального газа определённой массы от температуры $T_1 = 300$ К до температуры $T_2 = 420$ К и последующего изобарного нагревания газ был переведён в начальное состояние в процессе, при котором давление уменьшается прямо пропорционально объёму. Определите температуру идеального газа после изобарного нагревания.

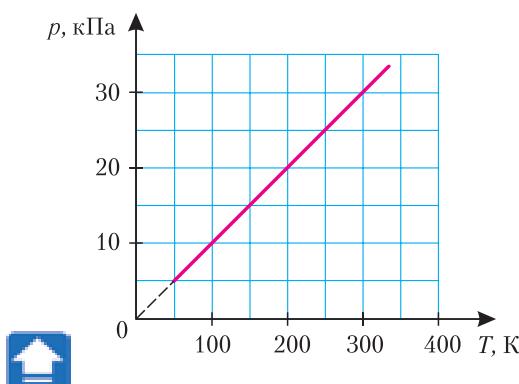


Рис. 38

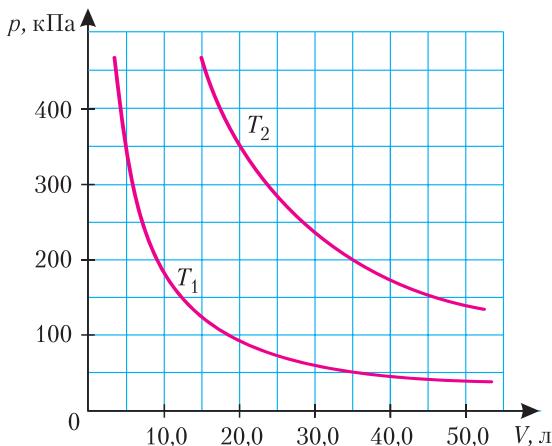


Рис. 39

§ 7. Строение и свойства твёрдых тел

В повседневной жизни мы считаем твёрдым любое тело, сохраняющее форму и объём в отсутствие внешних воздействий, например, тела, изготовленные из металлов, пластика, льда, стекла. Твёрдые тела делят на две группы, различающиеся по своим свойствам: кристаллические и аморфные. Чем же отличаются кристаллические твёрдые тела от аморфных?

Кристаллы. К кристаллическим телам относят минералы, например поваренную соль, медный купорос, кварц, квасцы (рис. 40), горный хрусталь и металлы в твёрдом состоянии.



Рис. 40

Кристаллы — 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. 41).

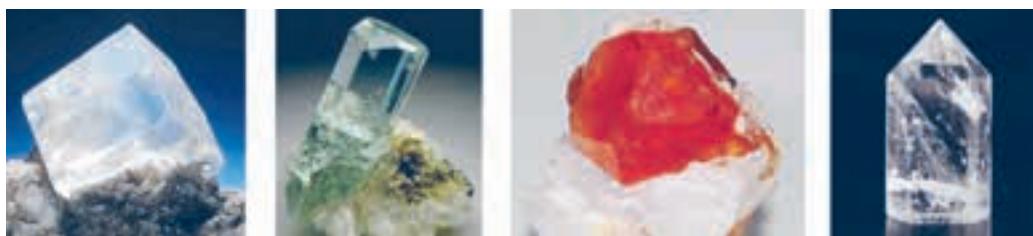


Рис. 41

Частицы кристалла удерживаются на определённом усреднённом расстоянии друг от друга ($\sim 0,1$ нм) силами межатомного и межмолекулярного взаимодействий. Несмотря на тепловые колебания, они образуют упорядоченную

пространственную структуру. Геометрическим образом этой структуры является *кристаллическая решётка*. Узлы *кристаллической решётки* — положения устойчивого равновесия колеблющихся частиц (ионов, атомов или молекул), образующих кристалл.

Основой строения кристалла служит так называемая *элементарная кристаллическая ячейка* — многогранник наименьших размеров, последовательным переносом без изменения ориентации которого вместе с частицами, находящимися внутри этого многогранника, можно построить весь кристалл.

На рисунках 42 представлены самые простые элементарные ячейки: кубические (*а* — примитивная, *б* — объёмно-центрированная, *в* — гранецентрированная) и гексагональная призма (*г*).

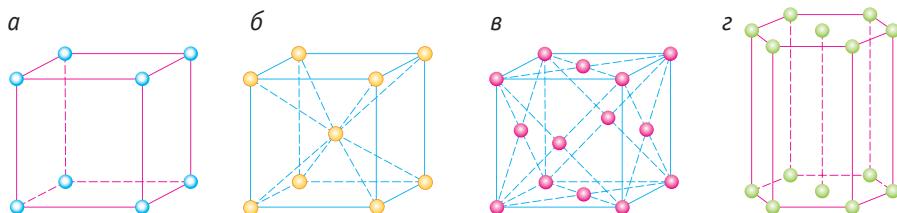


Рис. 42

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

Интересно знать

Чтобы понять, почему в кристаллических телах упорядоченное размещение частиц, проделаем опыт. Насыплем на вогнутое стекло одинаковые маленькие шарики (рис. 43, *а*) и слегка встряхнём их несколько раз. Можно увидеть, что шарики разместятся в строгом порядке (рис. 43, *б*). Шарики располагаются на стекле в самом низком из возможных положений, что соответствует минимуму их потенциальной энергии в гравитационном поле Земли.

Кристаллическая структура также связана с минимумом потенциальной энергии, т. е. при образовании кристаллов частицы самопроизвольно располагаются так, чтобы потенциальная энергия их взаимодействия была минимальной.

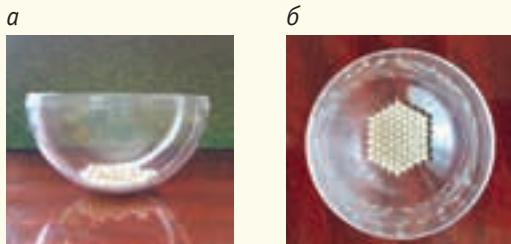


Рис. 43

Типы кристаллов. В зависимости от вида частиц, образующих кристалл, и от характера сил взаимодействия между ними различают четыре основных типа кристаллов.



Типичным примером ионного кристалла является кристалл хлорида натрия NaCl (рис. 44, а, б). Кристаллы с ионной решёткой тугоплавки и обладают высокой твёрдостью.

Примерами атомных кристаллов могут служить алмаз и графит. Эти кристаллы тождественны по химической природе (они состоят из атомов углерода), но отличаются по своему строению (рис. 45). В кристаллической решётке алмаза каждый атом углерода находится в центре тетраэдра, вершинами которого служат четыре ближайших атома, и прочно связан с этими атомами посредством объединения валентных электронов (рис. 45, а). Именно такой жёсткой связью и обусловлена уникальная твёрдость алмаза. Кристаллическая решётка графита имеет слоистую структуру (рис. 45, б). Атомные слои графита слабо связаны друг с

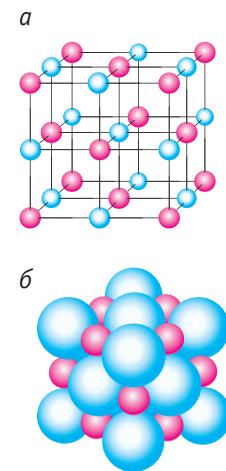


Рис. 44



Рис. 45

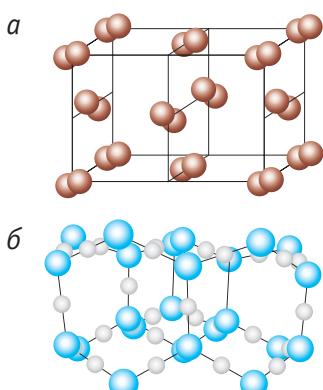


Рис. 46

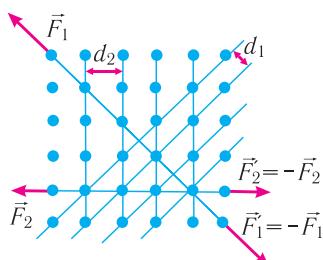


Рис. 47

Характерной особенностью монокристаллов является их *анизотропия*, т. е. зависимость физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления внутри кристалла. Анизотропия монокристаллов обусловлена различием в плотности расположения частиц в кристаллической решётке по разным направлениям. На рисунке 47 показано, что расстояния между атомными плоскостями в кристалле неодинаковы ($d_1 < d_2$). Поэтому, в частности, отличаться будут и силы, необходимые для его разрыва ($F_1 > F_2$). Например, кусок слюды достаточно легко расслоить в одном из направлений на тонкие пластины, но для того, чтобы разорвать его в направлении, перпендикулярном пластинкам, потребуются гораздо большие усилия.

Интересно знать

Анизотропия свойственна некоторым материалам биологического происхождения. Например, костным и мышечным тканям человека и животных, древесине и листьям, траве и др.

Большинство кристаллических твёрдых тел являются *поликристаллами*.

Поликристаллы — твёрдые тела, состоящие из большого числа сросшихся между собой маленьких кристаллов.

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

Вы сами можете в домашних условиях вырастить монокристаллы (рис. 48, а) и поликристаллы (рис. 48, б) медного купороса (сульфата меди(II) CuSO_4).

Кристаллические тела имеют определённую температуру плавления $t_{\text{пл}}$, не изменяющуюся в процессе плавления при постоянном давлении. Зависимость температуры кристаллического тела от полученного им количества теплоты представлена на рисунке 49, график 1.



Рис. 48

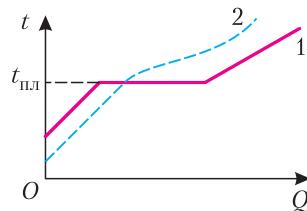
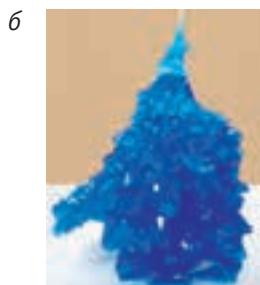


Рис. 49

От теории к практике

1. Почему у шара, изготовленного из монокристалла, при нагревании изменяется не только объём, но и форма?

2. Будет ли при нагревании шара, изготовленного из стали, изменяться не только объём, но и форма?

Аморфные тела. К аморфным (от греч. *amorphous* — бесформенный) телам относят опал, обсидиан, эбонит, сургуч (рис. 50), стекло, различные пластмассы, смолы (вар, канифоль, янтарь) и др.

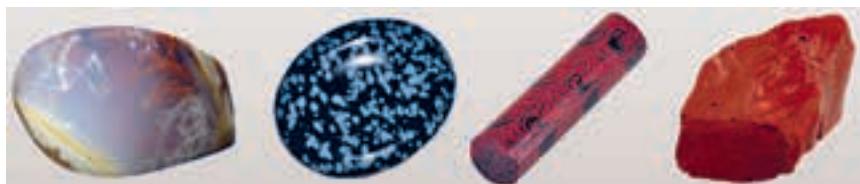


Рис. 50

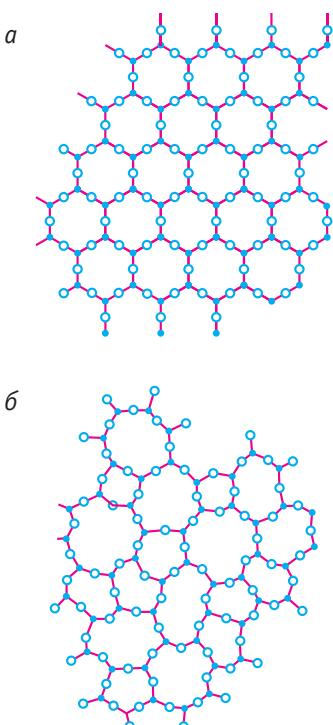


Рис. 51



Рис. 52

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

Зависимость температуры аморфного тела от полученного им количества теплоты представлена на рисунке 49, график 2. 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. Аморфное состояние — бесформенное состояние со слабо выраженной текучестью.

Аморфные тела называют переохлаждёнными жидкостями, так как у них, как и у жидкостей, существует только близкий порядок расположения частиц.

На рисунках 51 схематически представлено строение кристаллического кварца (рис. 51, а) и аморфного кварца (рис. 51, б).

Аморфные тела при определённых условиях могут кристаллизоваться. Сахар-песок является кристаллическим телом (рис. 52, а). Если его расплавить, то, застывая, он превращается в прозрачный стеклообразный леденец (рис. 52, б), 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 сильно выраженными магнитными свойствами, поэтому незаменим при изготовлении магнитных головок для звуко- и видеозаписи. Кроме того, аморфные металлы обладают высокой антикоррозийной стойкостью.

От теории к практике

1. Имеются две тонкие пластиинки, покрытые воском. К пластинкам поочерёдно прикоснулись раскалённой спицей. На одной пластинке при плавлении воска образовалось круглое пятно, а на другой — овал. Какое из этих тел кристаллическое, а какое аморфное?

2. В двух сосудах необходимо расплавить два твёрдых тела. Как, наблюдая за процессом плавления, можно определить, какое из этих тел кристаллическое, а какое аморфное?

Интересно знать

Стекло обладает текучестью даже при нормальных условиях, хотя и течёт крайне медленно. В старинных зданиях, где окна не меняли достаточно долго, можно заметить постепенное утолщение стёкол книзу.

**ТВЁРДЫЕ ТЕЛА****Кристаллические**

Ионные

Атомные

Металлические

Молекулярные

Аморфные

Дальний порядок в расположении частиц

Имеют определённую температуру плавления

Не обладают текучестью

Монокристаллы анизотропны; поликристаллы изотропны

Ближний порядок в расположении частиц

Не имеют определённой температуры плавления

Обладают текучестью

Изотропны



1. Какие тела называют твёрдыми?
2. Каковы особенности строения кристаллических твёрдых тел?
3. Какие типы кристаллов вы знаете? Чем они отличаются друг от друга?

4. В чём отличие между моно- и поликристаллами?
5. В чём отличие между понятиями «анизотропия» и «изотропия»?
6. Чем отличаются основные физические свойства кристаллических и аморфных тел?

Домашняя лаборатория

Проведите наблюдение за ростом кристаллов. Для этого приготовьте насыщенный раствор поваренной соли в сосуде с горячей водой (раствор становится насыщенным, когда соль перестаёт растворяться в воде и начинает оседать на дно). Отфильтруйте раствор, переливая в другой сосуд. В остывший раствор опустите нить с привязанным к ней кристалликом соли. Другой конец нити закрепите на стержне, который поместите на край сосуда. Наблюдайте за ростом кристалла в течение нескольких дней.

Какова форма выращенного вами кристалла? Является ли он поликристаллом?

§ 8. Строение и свойства жидкостей

Физические свойства различных газов, находящихся при достаточно малых плотностях и высоких температурах, почти одинаковы. Свойства твёрдых тел существенно зависят от взаимодействия частиц, из которых они состоят, и весьма различны. А что определяет свойства жидкостей и их отличие от газов и твёрдых тел?

Вещество в жидком агрегатном состоянии занимает промежуточное положение между кристаллами и газами и вследствие этого имеет некоторые общие черты с обоими этими состояниями. Например, для жидкостей, как и для кристаллических тел, характерно наличие определённого объёма. Вместе с тем жидкости, подобно газам, принимают форму сосуда, в котором находятся, и могут непрерывно переходить в газообразное агрегатное состояние. Однако жидкости обладают рядом только им присущих особенностей, из которых наиболее характерная — текучесть.

Среднее расстояние между молекулами вещества в жидком состоянии меньше (рис. 53, *а*), чем в газообразном (рис. 53, *б*). Оно равно приблизительно одному-двум диаметрам молекулы, т. е. порядка 0,5 нм. Поэтому плотность жидкости приблизительно в 10^3 раз превышает плотность газа. Свойства жидкостей зависят как от особенностей движения молекул, так и от сил их взаимодействия.

Опытным путём в жидкостях обнаружен *ближний порядок* в расположении частиц (рис. 53, а). В отличие от твёрдых кристаллических тел (рис. 53, в) в жидкостях упорядоченность в расположении молекул сохраняется лишь среди ближайших соседей (на расстояниях, равных нескольким диаметрам молекул).

Молекулы жидкости совершают непрерывные и беспорядочные колебания около временных положений их равновесия. Средняя кинетическая энергия таких колебаний молекул определяет температуру жидкости. Молекулы, получившие дополнительную энергию в результате столкновений с другими молекулами, могут «перепрыгнуть» в новое (тоже временное) положение равновесия. Это положение равновесия находится от предыдущего, как правило, на расстоянии порядка размеров самих молекул. Таким образом, молекулы медленно перемещаются внутри жидкости, находясь в течение некоторого промежутка времени Δt около определённых мест.

Близкий порядок* в жидкости постоянно разрушается тепловым движением молекул и вновь создаётся силами межмолекулярного взаимодействия. Из-за отсутствия дальнего порядка в расположении частиц жидкостям, за небольшим исключением, не свойственна анизотропия, присущая кристаллам.

Таким образом, свойства жидкостей определяются расстояниями между молекулами, соизмеримыми с их собственными размерами, и возможностью относительно свободного перемещения молекул.

Отметим, что утверждение «жидкость не имеет собственной формы» не совсем корректно. 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. Кроме того, действие молекулярных сил притяжения приводит к сокращению свободной поверхности жидкости.

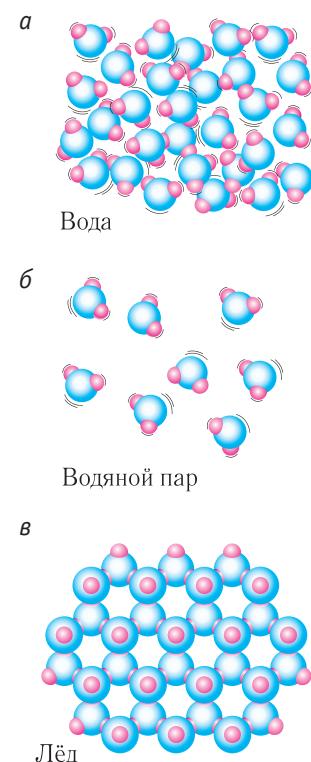


Рис. 53

* Наличие в жидкостях близкого порядка в расположении частиц служит причиной того, что структуру жидкостей называют квазикристаллической (кристаллоподобной).

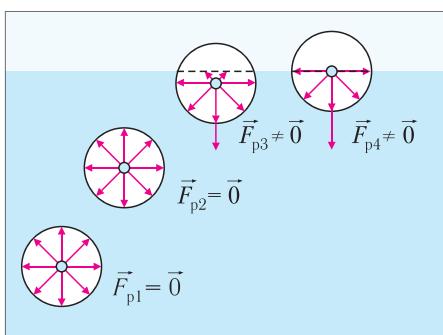


Рис. 54

Молекулы, расположенные в тонком слое вблизи поверхности, находятся в особых условиях из-за того, что в поверхностном слое жидкости проявляется нескомпенсированность молекулярных сил притяжения. В самом деле, любая молекула внутри жидкости со всех сторон окружена соседними (одинаковыми) молекулами, действие которых взаимно компенсируется (рис. 54). Поэтому здесь молекулярные силы притяжения уравновешиваются и результирующая \vec{F}_{p1} этих сил равна нулю. Так как концентрация молекул в воздухе значительно меньше, чем в жидкости, то результирующая сил притяжения каждой молекулы поверхностного слоя молекулами газа меньше результирующей сил её притяжения молекулами жидкости. Таким образом, результирующие силы притяжения, действующих на молекулы поверхностного слоя, направлены внутрь жидкости. Под действием этих сил часть молекул поверхностного слоя втягивается внутрь, число молекул на поверхности уменьшается и площадь поверхности жидкости сокращается до определённой величины. Минимальную площадь поверхности при данном объёме имеют шарообразные тела. Например, капли воды при соприкосновении сливаются в одну, форма которой отличается от сферической из-за воздействия силы тяжести и силы реакции опоры.

Поверхностное натяжение приводит к тому, что вода собирается в капли (рис. 55), образуются мыльные пузыри (рис. 56), жук-водомерка передвигается по поверхности воды (рис. 57), а в состоянии невесомости любой объём свободной жидкости принимает сферическую форму.



Рис. 55



Рис. 56



Рис. 57



Свойства жидкостей
(малая сжимаемость и текучесть) определяются

расстояниями между
молекулами, соизмеримыми с их
собственными размерами

возможностью относительно
свободного перемещения
молекул



- Что в строении жидкостей определяет их свойства?
- Каковы особенности движения молекул жидкости?
- Каковы общие черты и в чём различия в свойствах жидкостей и газов?
- Каковы общие черты и в чём различия в свойствах жидкостей и твёрдых тел?
- В жидкостях частицы совершают колебания возле временных положений равновесия, взаимодействуя с соседними частицами. Через некоторый промежуток времени частица совершает «прыжок» к другому расположению равновесия. Какое свойство жидкостей можно объяснить таким характером движения их частиц?



§ 8-1
§ 8-2

§ 9. Испарение и конденсация. Насыщенный пар

Почему в плотно закрытом сосуде горячая вода остывает медленнее, чем в открытом? Почему зимой на деревьях иногда появляется иней? Чем идеальный газ отличается от пара?

Испарение и конденсация. 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 (гидросфера), с поверхности почвы и растительного покрова в воздухе всегда находятся водяные пары, которые могут конденсироваться, образовывать облака, выпадать в виде осадков. Процессы испарения и конденсации распространены в природе и технике, и изучение их особенностей имеет большое практическое значение.

Рассмотрим плотно закрытый сосуд, в котором вода занимает нижнюю часть, а остальное пространство заполнено паром. Молекулы в воде и паре находятся в непрерывном движении и могут как вылетать из воды в пар, так и из пара возвращаться в воду. Таким образом, в сосуде одновременно протекают

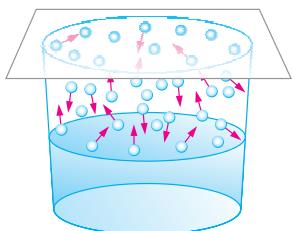


Рис. 58

два противоположно направленных процесса — переход воды в газообразное состояние (*испарение*) и переход водяного пара в жидкость (*конденсация*) (рис. 58).

После герметизации сосуда в течение некоторого промежутка времени испарение жидкости преобладает над конденсацией её пара. Если при этом из окружающей среды к системе «жидкость — пар» не поступает энергия, то жидкость охлаждается. Это происходит вследствие того, что поверхностный слой жидкости

покидают молекулы, обладающие наибольшей скоростью. Такие молекулы имеют и наибольшую кинетическую энергию теплового движения, что позволяет им преодолеть силы притяжения, действующие в поверхностном слое жидкости. Работа сил притяжения обеспечивает то, что скорость каждой вылетающей из жидкости молекулы уменьшается, а скорость каждой влетающей в неё молекулы, наоборот, увеличивается. Такие изменения скорости, а значит, и кинетической энергии молекул, пересекающих поверхность жидкости, позволяют системе «жидкость — пар» достичь состояния теплового равновесия, при котором температуры жидкости и её пара одинаковы.

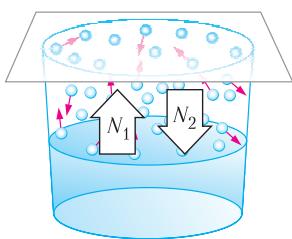


Рис. 59

При испарении жидкости в плотно закрытом сосуде плотность пара над ней увеличивается, и одновременно растёт число молекул, влетающих обратно в жидкость. Концентрация молекул пара возрастает до тех пор, пока число N_1 молекул, покидающих жидкость (рис. 59), не станет равным числу N_2 молекул, возвращающихся в неё за тот же промежуток времени: $N_1 = N_2$. Уровень жидкости в сосуде при этом не изменяется с течением времени. Между жидкостью и её паром устанавливается состояние *динамического равновесия*.

Оно будет существовать до тех пор, пока не изменится температура или объём системы.

От теории к практике

1. Обычно при испарении жидкость охлаждается. Когда возможно испарение жидкости при постоянной температуре?
2. Если сосуд с водой плотно закрыть, то сначала количество воды уменьшится, а затем будет оставаться постоянным. Почему?

Насыщенный пар.

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью, называют **насыщенным паром**.

Давление такого пара называют *давлением насыщенного пара*.

Насыщенный пар обладает свойствами, отличающимися от свойств идеального газа.

Первое отличие состоит в том, что *давление насыщенного пара не зависит от его объёма при постоянной температуре*. Число молекул, переходящих из жидкости в пар через единичную площадку за единичный промежуток времени, зависит только от состава жидкости и её температуры. Например, за промежуток времени $\Delta t = 1$ с со свободной поверхности воды, площадь которой $S = 1 \text{ см}^2$, при комнатной температуре вылетает приблизительно $N = 10^{22}$ молекул.

Второе отличительное свойство: при увеличении температуры давление p_{n} насыщенного пара возрастает значительно быстрее, чем давление $p_{\text{i.g.}}$ идеального газа.

Давление насыщенного пара зависит также и от рода жидкости. Чем меньше силы взаимодействия между молекулами жидкости, тем большая концентрация молекул насыщенного пара, а значит, тем больше его давление и плотность.

При изменении объёма насыщенного пара его масса также 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.

От теории к практике

В сосуде находится жидкость и её насыщенный пар. Зависит ли давление насыщенного пара от: а) рода жидкости; б) объёма сосуда; в) температуры жидкости; г) площади свободной поверхности жидкости?

Ненасыщенный пар. Если сосуд с водой и её насыщенным паром открыть, то пар начнёт выходить наружу, и концентрация его молекул в сосуде уменьшится. Это приведёт к тому, что процесс испарения будет преобладать над процессом конденсации (рис. 60), и уровень жидкости в сосуде понизится. При этом



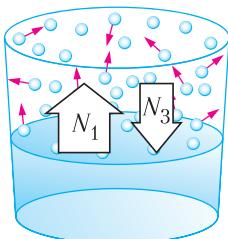


Рис. 60

нарушится динамическое равновесие ($N_1 > N_3$) между водой и её паром. Давление (плотность) пара уменьшится, и пар станет *ненасыщенным*.

Ненасыщенный пар — пар, давление (плотность) которого меньше давления (плотности) насыщенного пара при той же температуре.

Процесс испарения воды с поверхности морей и океанов, как правило, преобладает над процессом конденсации. Это означает, что над морями и океанами обычно находится ненасыщенный водяной пар, который, поднимаясь вверх, охлаждается и конденсируется, образуя облака и тучи.

Интересно знать

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 в атмосферу выделяется такое же количество теплоты, которое ранее потребовалось для испарения жидкости. 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, т. е. в одних областях поверхности и атмосферы Земли преобладают процессы испарения воды, а в других — процессы конденсации водяного пара.



Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью, называют насыщенным

Давление насыщенного пара

прямо пропорционально

абсолютной
температуре T

концентрации
молекул n

при $T = \text{const}$
не зависит от
объёма V

$$p = nkT$$



1. Каковы общие черты процессов испарения и конденсации? Чем они отличаются?
2. Почему при испарении жидкость обычно охлаждается?
3. Какой пар называют насыщенным?
4. Какие физические процессы обусловливают состояние динамического равновесия между жидкостью и её паром?
5. Какие свойства насыщенного пара отличают его от идеального газа?



§ 9-1

§ 10. Влажность воздуха

В ежедневных сводках погоды наряду со значениями температуры воздуха и атмосферного давления, как правило, называют значение относительной влажности воздуха. Почему влажность воздуха влияет на жизнедеятельность человека?

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

Абсолютная влажность $\rho_{\text{п}}$ воздуха — физическая величина, равная плотности водяного пара, находящегося в воздухе при данных условиях.

Обычно абсолютную влажность выражают в граммах на кубический метр $\left(\frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right)$.

Поскольку атмосферный воздух представляет собой смесь различных газов (азот, кислород, углекислый газ и др.) и водяного пара, то атмосферное давление определяется суммой парциальных давлений компонентов сухого воздуха и водяного пара. Используя уравнение Клапейрона—Менделеева, плотность пара можно определить через его парциальное давление $p_{\text{п}}$:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{p_{\text{п}} M}{R T}, \quad (10.1)$$

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

Зная только плотность $\rho_{\text{п}}$ пара, нельзя судить о степени влажности воздуха. Ведь при одном и том же значении плотности пар может быть как близок к насыщению, так и далёк от него. Оказывается, чем ниже температура, тем ближе пар к насыщению. А ведь именно от этого зависит интенсивность испарения

воды и потеря влаги живыми организмами. Вот почему вводят вторую характеристику влажности воздуха — относительную влажность, которая показывает, насколько водяной пар при данной температуре далёк от насыщения.

Относительная влажность φ воздуха — физическая величина, равная отношению абсолютной влажности p_{n} к плотности $\rho_{\text{н}}$ насыщенного водяного пара при данной температуре.

Обычно относительную влажность выражают в процентах:

$$\varphi = \frac{p_{\text{n}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100 \%. \quad (10.2)$$

Чем ниже относительная влажность воздуха, тем интенсивнее испаряется вода. При относительной влажности воздуха $\varphi = 100 \%$ водяной пар становится насыщенным и оказывается в динамическом равновесии со своей жидкостью. В этом случае процессы испарения и конденсации идут с одинаковой скоростью.

Поскольку плотность пара и его парциальное давление связаны соотношением (10.1), то относительную влажность можно определить как отношение парциального давления p_{n} водяного пара, находящегося в воздухе при данной температуре, к давлению $p_{\text{н}}$ насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p_{\text{n}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 %. \quad (10.3)$$

Таким образом, относительная влажность зависит не только от абсолютной влажности, но и от температуры воздуха.

От теории к практике

Докажите, что относительная влажность воздуха резко уменьшается при возрастании температуры.

Подсказка. Воспользуйтесь формулами $p = nkT$ и $\varphi = \frac{p_{\text{n}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100 %$.

Значения давления $p_{\text{н}}$ и плотности $\rho_{\text{н}}$ насыщенного водяного пара при различных температурах приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}, \text{kPa}$	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}, \frac{\text{Г}}{\text{м}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}, \text{kPa}$	$\rho_{\text{H}_2\text{O}}, \frac{\text{Г}}{\text{м}^3}$
-20	0,103	0,85	8	1,06	8,3
-18	0,125	1,05	10	1,228	9,4
-16	0,151	1,27	12	1,402	10,7
-14	0,181	1,51	14	1,598	12,1
-12	0,217	1,80	16	1,817	13,6
-10	0,260	2,14	18	2,063	15,4
-8	0,337	2,54	20	2,338	17,3
-6	0,368	2,99	22	2,643	19,4
-4	0,437	3,51	24	2,984	21,8
-2	0,517	4,13	26	3,361	24,4
0	0,611	4,84	28	3,780	27,2
2	0,705	5,60	30	4,242	30,3
4	0,813	6,40	40	7,37	51,2
6	0,934	7,3	50	12,3	83,0

От теории к практике

1. Водяной пар, содержащийся в воздухе, становится насыщенным при значении температуры $t_1 = 6,0 ^\circ\text{C}$. Какой будет его относительная влажность, если температура воздуха поднимется до $t_2 = 10 ^\circ\text{C}$; $t_3 = 16 ^\circ\text{C}$; $t_4 = 24 ^\circ\text{C}$; $t_5 = 30 ^\circ\text{C}$; $t_6 = 50 ^\circ\text{C}$? Сделайте вывод, как изменяется относительная влажность воздуха при увеличении температуры.

2. Как правило, мы чувствуем себя комфортно, когда парциальное давление водяного пара при комнатной температуре ($t = 20 ^\circ\text{C}$) составляет примерно $p_{\text{н}} = 1,1 \text{ кПа}$. Какова при этом относительная влажность воздуха?

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.

От теории к практике

Температура воздуха $t = 16^{\circ}\text{C}$. Используя таблицу «Давление и плотность насыщенного водяного пара», укажите, каким будет водяной пар, находящийся в воздухе (насыщенным, ненасыщенным, пересыщенным), если его: а) давление достигло значения $p_{\text{n}} = 1,819 \text{ кПа}$; б) плотность $\rho_{\text{n}} = 13,0 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$.

Давление насыщенного пара уменьшается при понижении температуры (см. табл. 1). Из формулы (10.3) следует, что при одном и том же давлении p_{n} водяного пара относительная влажность тем выше, чем ниже температура, и при некотором её значении может стать равной 100 %.

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 $t_{\text{d}} = 26^{\circ}\text{C}$, а плотность водяного пара $\rho_{\text{n}} = 24,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Ночью температура понизилась до $t_{\text{n}} = 16^{\circ}\text{C}$. При этой температуре плотность насыщенного водяного пара $\rho_{\text{n}} = 13,6 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. Значит, избыток пара сконденсировался и выпал в виде росы. Этот процесс является причиной образования тумана (в воздухе всегда есть пылинки, которые являются центрами конденсации), облаков и дождя. В технике конденсация обычно осуществляется на охлаждаемых поверхностях.

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

От теории к практике

Какой должна быть точка росы, чтобы на деревьях появился иней?

Приборы для измерения влажности. Относительную влажность воздуха обычно измеряют психрометром, состоящим из двух термометров — сухого и влажного (рис. 61). Сухой термометр показывает температуру воздуха.

Резервуар влажного термометра обёрнут тканью, смачиваемой водой. Вода с ткани испаряется, охлаждая при этом термометр. Чем меньше относительная влажность воздуха, тем интенсивнее испаряется вода и тем сильнее охлаждается влажный термометр. И наоборот — при большой относительной влажности воздуха влажный термометр охлаждается незначительно.

При 100 %-ной относительной влажности 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 (табл. 2).



Рис. 61

Таблица 2 — Психрометрическая таблица

Показания сухого термоме- тра, °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

От теории к практике

Как изменится разность показаний термометров психрометра в кабинете физики после влажной уборки?

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 необходимо 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, роса или иней.



Влажность воздуха

абсолютная влажность $\rho_{\text{п}}$

относительная влажность φ

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

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

прибор для измерения — психрометр



- Что называют абсолютной и относительной влажностями воздуха? В каких единицах их измеряют?
- Что называют точкой росы?

3. Как можно найти относительную влажность воздуха, если известны его температура и точка росы?
4. Как изменяются абсолютная и относительная влажности воздуха при его нагревании?
5. На каких физических явлениях основано действие психрометра?
6. Можно ли, используя психрометр, определить относительную влажность воздуха, температура которого ниже 0 °C?

Примеры решения задач

Пример 1. Температура воздуха в комнате $t_1 = 24$ °C, а его относительная влажность $\varphi_1 = 45$ %. На улице температура и относительная влажность воздуха $t_2 = 2,0$ °C и $\varphi_2 = 80$ % соответственно. Каким будет направление движения водяных паров, если открыть форточку: с улицы в комнату или из комнаты на улицу?

Дано:

$$t_1 = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 45 \text{ } \%$$

$$t_2 = 2,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varphi_2 = 80 \text{ } \%$$

$$p_1 = ?$$

$$p_2 = ?$$

Решение. При температуре воздуха $t_1 = 24$ °C давление насыщенных паров $p_{\text{н1}} = 2,984$ кПа, а при температуре $t_2 = 2,0$ °C — $p_{\text{н2}} = 0,705$ кПа (см. таблицу 1 § 10). Тогда давление водяного пара в комнате

$$p_1 = \frac{\varphi_1 p_{\text{н1}}}{100 \%} = \frac{45 \% \cdot 2,984 \text{ кПа}}{100 \%} = 1,34 \text{ кПа},$$

а на улице

$$p_2 = \frac{\varphi_2 p_{\text{н2}}}{100 \%} = \frac{80 \% \cdot 0,705 \text{ кПа}}{100 \%} = 0,564 \text{ кПа}.$$

$p_2 < p_1$, следовательно, пар выходит из комнаты на улицу.

Ответ: пар выходит из комнаты на улицу.

Пример 2. Вечером при температуре $t_1 = 20$ °C относительная влажность воздуха $\varphi_1 = 60$ %. Выпадет ли роса, если ночью температура понизится до $t_2 = 12$ °C?

Дано:

$$t_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\varphi_1 = 60 \text{ } \%$$

Выпадет ли роса?

Решение. Для того чтобы узнать, выпадет ли роса при понижении температуры воздуха до $t_2 = 12$ °C, необходимо сравнить плотность (давление) насыщенного пара при этой температуре с плотностью (парциальным давлением) пара при температуре $t_1 = 20$ °C.

При температуре $t_2 = 12^\circ\text{C}$ плотность насыщенного водяного пара $\rho_{\text{H}2} = 10,7 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (см. таблицу 1 § 10). Плотность водяного пара, содержащегося в воздухе при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$, можно определить, воспользовавшись формулой

$$\varphi = \frac{\rho_1}{\rho_{\text{H}1}} \cdot 100 \%,$$

где $\rho_{\text{H}1} = 17,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$ (см. таблицу 1 § 10):

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

Поскольку $\rho_1 < \rho_{\text{H}2}$ ($10,4 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} < 10,7 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$), то имеющегося в воздухе количества водяного пара недостаточно для насыщения, роса не выпадет.

Ответ: роса не выпадет.



Упражнение 6

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

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

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

4. При температуре $t = 28^\circ\text{C}$ относительная влажность воздуха $\varphi = 50 \%$. Определите массу росы, выпавшей из воздуха объёмом $V = 1,0 \text{ км}^3$, если его температуру понизили на $T_1 - T_2 = 16 \text{ К}$.

5. Определите относительную и абсолютную влажности воздуха, если сухой и влажный термометры психрометра показывают $t_{\text{c}} = 14^\circ\text{C}$ и $t_{\text{v}} = 10^\circ\text{C}$ соответственно.

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



ГЛАВА 2

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 11. Термодинамическая система.

Внутренняя энергия. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

Полную энергию физической системы можно представить как алгебраическую сумму её механической энергии и внутренних энергий тел, образующих систему. Убыль механической энергии системы в ряде случаев происходит при самопроизвольном переходе её части во внутреннюю энергию тел системы. Так, например, режущие инструменты заметно нагреваются при заточке. При скольжении конькобежца под коньками тает лёд, что обеспечивает хорошее скольжение. В этих примерах тела при трении нагреваются, и интенсивность теплового движения их молекул возрастает, что приводит к увеличению внутренней энергии тел. Как же определить внутреннюю энергию термодинамической системы? И что понимают под термодинамической системой?

Термодинамическая система. В термодинамике физические тела и их модели называют *термодинамическими системами*. Для их описания используют параметры системы, такие, как давление, объём, температура (макропараметры), а не физические характеристики молекул (микропараметры). Макропараметры можно непосредственно измерить, используя приборы, или выразить через другие величины, которые можно измерить на опыте. Мы рассмотрим простейшие термодинамические системы, состояние которых определяют, используя только давление, объём и температуру.

Тела, образующие термодинамическую систему, могут обмениваться с окружающей средой энергией, а также веществом. Если этого не происходит, то термодинамическую систему называют *замкнутой* или *изолированной*.



От теории к практике

В одном случае газ находится в герметично закрытом теплонепроницаемом сосуде, а в другом — в стеклянной колбе. В каком случае газ как термодинамическая система является изолированным?



Внутренняя энергия. Рассматривая полную энергию макроскопического тела, необходимо учитывать не только его механическую энергию (кинетическую и потенциальную), но также и энергию, заключённую внутри самого тела, — **внутреннюю энергию**.

Внутренняя энергия макроскопического тела — алгебраическая сумма кинетической энергии теплового движения всех частиц, образующих тело, и потенциальной энергии их взаимодействия.

Внутренняя энергия любой термодинамической системы состоит из внутренних энергий тел, входящих в данную систему, и является одной из основных физических величин, используемых в термодинамике.

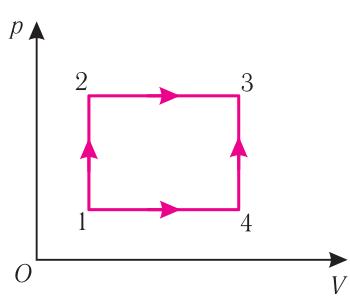


Рис. 62

В термодинамике представляет интерес не само значение внутренней энергии системы, а её изменение. Поэтому обычно принимают во внимание только те составляющие внутренней энергии, которые изменяются в рассматриваемых процессах.

Рассмотрим переход некоторой массы идеального газа из состояния 1, в котором его внутренняя энергия U_1 , в состояние 3, в котором его внутренняя энергия U_3 (рис. 62). Смену состояний

можно осуществить или при изохорном нагревании, а затем при изобарном расширении (процесс $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$), или при изобарном расширении, а затем при изохорном нагревании (процесс $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$). Однако приращение* внутренней энергии газа в обоих случаях одинаково:

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

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

* 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.

От теории к практике

На рисунке 63 представлены графики 1 и 2 зависимости внутренней энергии двух идеальных газов определённой массы от абсолютной температуры. Однаковы ли приращения внутренней энергии газов?

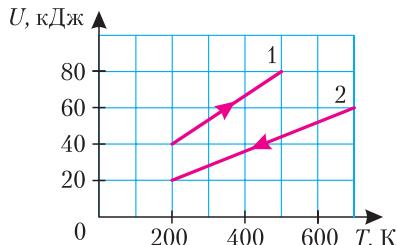


Рис. 63

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа. Определим внутреннюю энергию идеального одноатомного газа, т. е. газа, образованного атомами. Например, одноатомными газами являются инертные газы — гелий, неон, аргон и др.

Из определения понятия «идеальный газ» следует, что его внутренняя энергия является суммой кинетических энергий хаотического движения всех атомов (или молекул) (потенциальная энергия взаимодействия 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

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

С учётом того, что произведение постоянной Больцмана и постоянной Авогадро $kN_A = R$, где R — универсальная газовая постоянная, получим:

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (11.1)$$

или

$$U = \frac{3}{2} vRT.$$

Из формулы (11.1) следует, что **внутренняя энергия данной массы идеального одноатомного газа пропорциональна его абсолютной температуре**. Она не зависит от других макроскопических параметров состояния — давления и объёма. Следовательно, изменение внутренней энергии данной массы одноатомного идеального газа происходит только при изменении его температуры:

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

От теории к практике

1. Воздух при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении можно описывать моделью идеального газа. Как показывают расчёты, внутренняя энергия двухатомного газа больше внутренней энергии одинакового количества одноатомного газа, находящегося при такой же температуре, в

$\alpha = \frac{U_{\text{двуат}}}{U_{\text{одноат}}} = \frac{5}{3}$ раза. Учитывая, что воздух состоит в основном из двухатомных

молекул, оцените внутреннюю энергию воздуха в комнате, длина которой $a = 3,0$ м, ширина $b = 3,2$ м, высота $c = 2,5$ м.

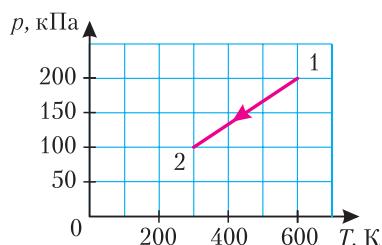


Рис. 64

Сравните полученный результат с кинетической энергией грузового автомобиля массой $m = 10$ т, движущегося со скоростью, модуль которой $v = 54 \frac{\text{км}}{\text{ч}}$. Сделайте вывод.

2. Идеальный одноатомный газ, количество вещества которого $v = 10,0$ моль, перевели из состояния 1 в состояние 2 (рис. 64). Как и на сколько изменилась внутренняя энергия газа?

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.

Изменить внутреннюю энергию термодинамической системы можно двумя способами: используя теплообмен и совершая работу. Процесс теплообмена и совершение работы характеризуют соответственно физическими величинами — количеством теплоты Q и работой A , которые являются мерами изменения внутренней энергии системы.



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

Внутренняя энергия макроскопического тела — алгебраическая сумма кинетической энергии теплового движения всех частиц, образующих тело, и потенциальной энергии их взаимодействия

Изменение внутренней энергии при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое зависит только от значений параметров этих состояний и не зависит от процесса перехода

Внутренняя энергия данной массы идеального одноатомного газа зависит только от температуры

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

Способы изменения внутренней энергии

совершение работы

теплообмен



- Что называют термодинамической системой?
- Что понимают под внутренней энергией макроскопического тела? термодинамической системы?
- Что представляет собой внутренняя энергия идеального газа? От чего зависит её значение?
- Идеальный газ 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. 65). Зависит ли приращение внутренней энергии газа от способа его перехода из состояния 1 в состояние 3?
- От каких параметров зависят значения внутренней энергии идеального газа и внутренней энергии реальных газов?

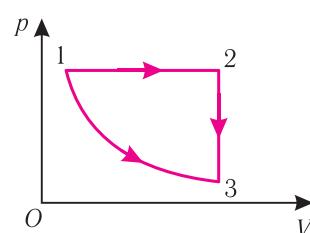


Рис. 65

Пример решения задачи

При изобарном охлаждении внутренняя энергия идеального одноатомного газа изменилась на $\Delta U = -6,0 \cdot 10^2$ Дж. Определите давление газа, если его объём изменился на $\Delta V = -1,0 \cdot 10^2$ см³.

Дано:

$$\begin{aligned}\Delta U &= -6,0 \cdot 10^2 \text{ Дж} \\ \Delta V &= -1,0 \cdot 10^2 \text{ см}^3 \\ &= -1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3\end{aligned}$$

p — ?

Решение. Приращение внутренней энергии некоторого количества идеального одноатомного газа

$$\Delta U = \frac{3}{2}vR\Delta T. \quad (1)$$

Используя уравнение Клапейрона–Менделеева, можно осуществить замену:

$$p\Delta V = vR\Delta T. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), получим: $p = \frac{2\Delta U}{3\Delta V}$.

$$p = \frac{2 \cdot (-6,0 \cdot 10^2 \text{ Дж})}{3 \cdot (-1,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3)} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ Па.}$$

Ответ: $p = 4,0 \cdot 10^6$ Па.



Упражнение 7

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

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

3. Идеальный одноатомный газ занимает объём $V = 4,0$ л, его давление $p = 0,30$ 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 значений внутренней энергии газа в конечном и начальном состояниях.

5. Масса гелия $m = 2,0$ кг, его давление $p = 60$ 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 одноатомного идеального газа $U = 1,2$ Дж. Определите число атомов газа.



§ 12. Работа в термодинамике

В 9-м классе вы узнали, что передача энергии путём совершения работы происходит в процессе силового взаимодействия тел. То есть работа, совершённая над рассматриваемым телом, есть не что иное, как работа сил, приложенных к этому телу со стороны всех остальных (внешних) тел, с которыми оно взаимодействует. Работа, совершённая над телом, может непосредственно изменить любой вид энергии этого тела, например внутреннюю энергию, поэтому работу силы рассматривают как меру изменения энергии физической системы.

Работа в термодинамике. Одним из способов изменения внутренней энергии термодинамической системы является совершение работы. Этот способ характеризуется передачей энергии в процессе механического взаимодействия тел. При этом механическая энергия одного тела переходит во внутреннюю энергию другого тела или, наоборот, убыль внутренней энергии одного тела сказывается на увеличении механической энергии другого тела.

Таким образом, при совершении работы происходит превращение энергии из одной формы в другую.

Поскольку для описания термодинамических систем используют макропараметры (давление, объём, температура), то работу в термодинамике необходимо выражать, применяя эти параметры.

Рассмотрим газ в цилиндре, закрытом поршнем, площадь которого S (рис. 66). Давление газа в цилиндре p . В результате изобарного расширения газа поршень переместился из положения 1 в положение 2 на расстояние Δl . Модуль силы давления газа на поршень $F = pS$. Эта сила совершила работу по перемещению поршня, равную

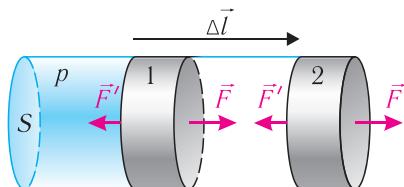


Рис. 66

$$A_{12} = F\Delta l \cos\alpha,$$

где α — угол между направлениями силы \vec{F} и перемещения поршня $\vec{\Delta l}$.

Поскольку в рассматриваемом примере $\alpha = 0$ и $\cos\alpha = 1$, то

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

Произведение $S\Delta l$ определяет изменение объёма $\Delta V = V_2 - V_1$, где V_1 — начальный объём газа; V_2 — объём газа в конечном состоянии (см. рис. 66).

Таким образом, работа силы давления газа при его изобарном расширении:

$$A_{12} = p\Delta V = p(V_2 - V_1). \quad (12.1)$$

Так как давление p газа — величина положительная, то из формулы (12.1) следует, что $A_{12} > 0$.

При изобарном расширении газа из состояния 1 в состояние 2 работа силы \vec{F}' (см. рис. 66):

$$A'_{12} = F'\Delta l \cos\beta,$$

где F' — модуль силы, действующей на газ со стороны поршня (внешняя сила); β — угол между направлениями силы \vec{F}' и перемещения $\Delta \vec{l}$ поршня.

Перемещение $\Delta \vec{l}$ поршня одно и то же, а сила давления \vec{F} газа на поршень и сила давления \vec{F}' поршня на газ — силы, подчиняющиеся третьему закону Ньютона:

$$\vec{F} = -\vec{F}'.$$

Следовательно, работы A'_{12} и A_{12} отличаются только знаком ($\cos\beta = \cos 180^\circ = -1$):

$$A'_{12} = -A_{12} = -p\Delta V.$$

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

Сила давления газа и внешние силы совершают работу
только в процессе изменения объёма газа

Расширение газа

Сжатие газа

Сила давления газа совершает
положительную работу над
внешними телами:

$$V_{\text{кон}} > V_{\text{нач}}; A > 0$$

Внешняя сила совершает над
газом положительную работу
(работа силы давления газа
отрицательная):

$$V_{\text{кон}} < V_{\text{нач}}; A < 0$$

Работа внешней силы
отрицательная:
 $A' < 0$

Работа внешней силы
положительная:
 $A' > 0$

От теории к практике

На рисунке 67, *а* представлен процесс перехода идеально-го газа определённой массы из состояния 1 в состояние 2, а на рисунке 67, *б* — процесс перехода этого же газа из состояния 3 в состояние 4. Сравните работы, совершённые силой давления газа в обоих процессах, и изменения значений его внутренней энергии.

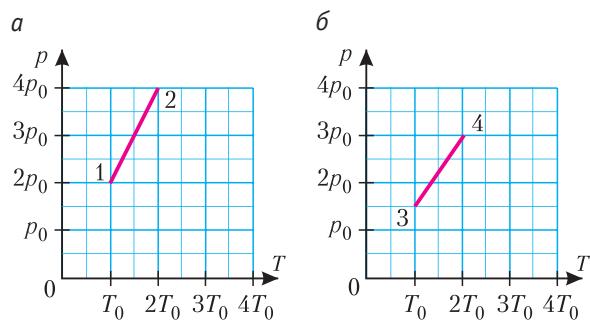


Рис. 67

Геометрическое толкование работы. Работу газа можно определить графически. Изобразим график зависимости давления газа от его объёма при $p = \text{const}$ (рис. 68). Если процесс перехода газа из начального состояния в конечное является изобарным (*AB* — изобара), то работа силы давления газа численно равна площади прямоугольника V_1ABV_2 .

Если процесс перехода газа из начального состояния в конечное не является изобарным (рис. 69), то работа силы давления газа при изменении 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 .



Работу газа определяют не только начальное и конечное состояния системы, но и вид процесса. Например, газ из состояния 1 можно перевести в состояние 3 либо в результате изотермического расширения (рис. 70), либо сначала изохорно понизив его давление до значения p_2 , а затем изобарно увеличив его объём до значения V_3 . В первом случае работа газа больше, чем во втором.

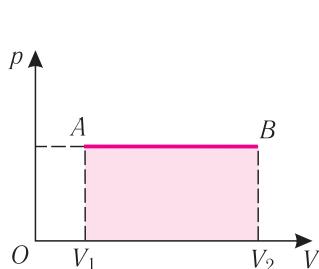


Рис. 68

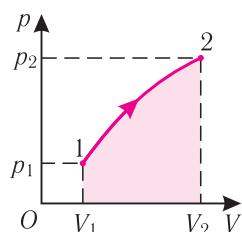


Рис. 69

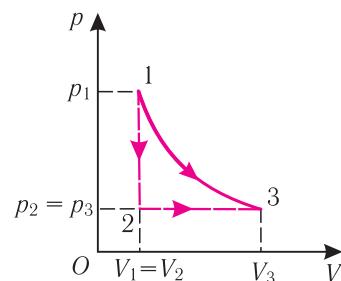


Рис. 70

Следовательно, работа, совершаемая термодинамической системой при переходе из одного состояния в другое, зависит не только от начального и конечного состояний системы, но и от вида процесса.

От теории к практике

На каком из представленных на рисунках 71, а–г графиков сила давления газа совершает в процессе перехода из состояния 1 в состояние 2:

- наибольшую работу;
- наименьшую работу?

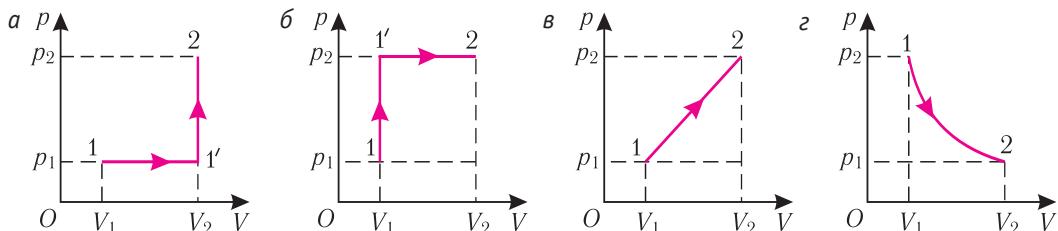
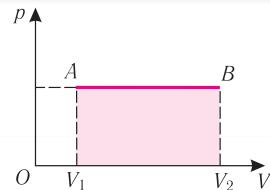


Рис. 71



Работу газа при изобарном процессе выражают через макроскопические параметры термодинамической системы: $A = p\Delta V$

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



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

Расширение идеального газа
Работа силы давления газа
положительная: $A > 0$;
работа внешней силы
отрицательная: $A' < 0$

Сжатие идеального газа
Работа силы давления газа
отрицательная: $A < 0$;
работа внешней силы
положительная: $A' > 0$



1. Как вычислить работу, совершающую силой давления газа при его расширении (сжатии)?
2. Как соотносятся между собой работа силы давления газа и работа внешних сил над газом?
3. В чём заключается геометрический смысл понятия «работа» в термодинамике?
4. Почему расширение газа при отсутствии теплообмена с окружающей средой сопровождается его охлаждением?
5. Идеальный газ переводят из состояния A в состояние B двумя способами: первый раз — $A1B$, а второй — $A2B$ (рис. 72). В каком случае работа, совершённая силой давления газа, больше? В каком случае изменение внутренней энергии больше?

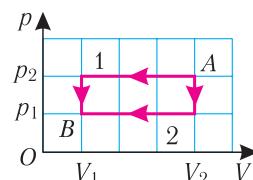


Рис. 72

Примеры решения задач

Пример 1. Определите работу, совершающую силой давления идеального газа определённой массы при переходе из состояния 1 в состояние 3 (рис. 73).

Решение. I способ. Работа A газа в ходе всего процесса равна сумме работ на участках $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$. Поскольку при переходе газа из состояния 1 в состояние 2 его объём не изменяется (изохорный процесс $V_2 = V_1$), то работа, совершаемая силой давления газа, $A_{12} = 0$. В процессе изобарного расширения (переход газа из состояния 2 в состояние 3) сила давления газа совершает работу

$$A_{23} = p_2 \Delta V = p_2 (V_3 - V_1).$$

Тогда при переходе из состояния 1 в состояние 3 работа

$$A = A_{12} + A_{23} = p_2 (V_3 - V_1).$$

$$\begin{aligned} A &= 2,00 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (2,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 - 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3) = \\ &= 2,00 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2,00 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

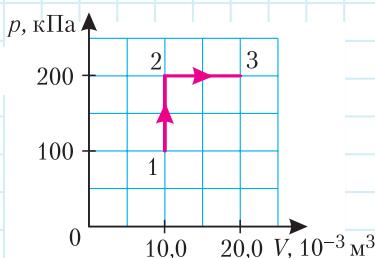


Рис. 73

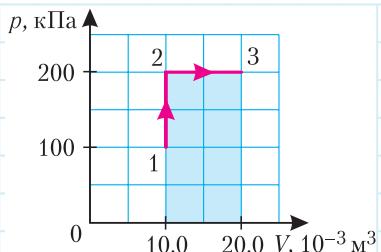


Рис. 74

II способ. Работа газа численно равна площади заштрихованной фигуры, ограниченной графиком зависимости давления от объёма, осью OV и прямыми, соответствующими значениям объёма $V_1 = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ и $V_2 = 20,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (закрашенная область на рисунке 74).

$$A = 2,00 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (2,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 - 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3) = 2,00 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 2,00 \text{ кДж.}$$

Ответ: $A = 2,00 \text{ кДж.}$

Пример 2. Определите работу, совершающую силой давления идеального газа определённой массы при изобарном повышении его температуры от $t_1 = 12^\circ\text{C}$ до $t_2 = 87^\circ\text{C}$, если давление газа $p = 190 \text{ кПа}$, а его начальный объём $V_1 = 6,0 \text{ дм}^3$.

Дано:

$$T_1 = 285 \text{ К}$$

$$T_2 = 360 \text{ К}$$

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

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

$$A = ?$$

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, $pV_1 = vRT_1$ и $pV_2 = vRT_2$. Следовательно,

$$A = vR(T_2 - T_1) = vRT_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) = pV_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right).$$

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

Ответ: $A = 0,30 \text{ кДж.}$



Упражнение 8

1. Сила давления идеального одноатомного газа определённой массы совершает отрицательную работу в изотермическом процессе. Как изменяются в этом процессе объём, давление и внутренняя энергия газа?

2. 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.

3. На рисунке 75 представлен график зависимости давления газа от объёма. Определите работу, совершенную силой давления газа при расширении.

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

5. Идеальный газ определённой массы, температура которого $T_1 = 290$ К и давление $p = 0,20$ МПа, занимает объём $V_1 = 0,10$ м³. Определите работу, совершенную силой давления газа при его изобарном нагревании до температуры $T_2 = 370$ К.

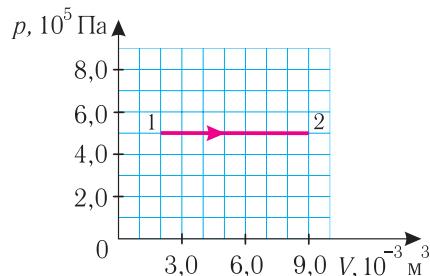


Рис. 75



§ 13. Количество теплоты

В чём причина изменения внутренней энергии макроскопического тела при теплообмене?

Теплообмен. Другим способом изменения внутренней энергии термодинамической системы является *теплообмен*.

Теплообмен — самопроизвольный процесс передачи внутренней энергии от тела с большей температурой телу с меньшей температурой без совершения работы.

Теплообмен между контактирующими телами называют *теплопередачей*. 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 кинетической энергии частичкам менее нагретого тела. В результате внутренняя энергия одного тела уменьшается, а другого увеличивается.

Таким образом, при теплопередаче не происходит превращения энергии из одной формы в другую: часть внутренней энергии более нагретого тела передаётся менее нагретому.

От теории к практике

Выберите верное утверждение.

1. Произошла теплопередача — значит, изменилась внутренняя энергия тела.
2. Внутренняя энергия тела изменилась — значит, произошла теплопередача.

Количество теплоты и удельная теплоёмкость. Количественной мерой энергии, сообщённой телу (или отданной им) в процессе теплообмена, является *количество теплоты*.

В СИ единицей количества теплоты Q является джоуль (Дж). Иногда для измерения количества теплоты используют внесистемную единицу — калорию (1 кал = 4,19 Дж).

Если процесс теплообмена не сопровождается изменением агрегатного состояния вещества, то

$$Q = cm(T_2 - T_1),$$

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

Удельная теплоёмкость зависит от свойств данного вещества и, как показывает опыт, в достаточно большом интервале температур практически не изменяется. Однако удельная теплоёмкость газа зависит от того, при каком процессе (изобарном или изохорном) осуществляется теплообмен.

От теории к практике

У какого из веществ, приведённых в таблице, изменение температуры окажется максимальным при сообщении им одинакового количества теплоты, если их массы равны?

Вещество	алюминий	железо	олово	свинец	цинк
Удельная теплоёмкость c , $10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	0,92	0,46	0,25	0,12	0,40

Интересно знать

Физическая величина, равная произведению массы тела на удельную теплоёмкость вещества, носит название теплоёмкость тела. Обозначают теплоёмкость C и измеряют в джоулях, делённых на кельвин $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{К}}\right)$: $C = \text{ст}$. 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 . Эту величину измеряют в джоулях, делённых на килограмм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. Для плавления тела массой m , предварительно нагретого до температуры плавления, ему необходимо сообщить количество теплоты $Q_{\text{пл}} = \lambda m$. При кристаллизации тела такое же количество теплоты выделяется: $Q_{\text{кр}} = -\lambda m$.

От теории к практике

Сосуд, в котором находился лёд при температуре $t_1 = -10^\circ\text{C}$, внесли в комнату. При достижении теплового равновесия температура содержимого сосуда повысилась до $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Какие тепловые процессы происходили с содержимым сосуда? Изменялась ли внутренняя энергия содержимого сосуда в процессе достижения теплового равновесия, и если изменялась, то как?

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 . Единицей измерения этой величины является джоуль, делённый на килограмм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. 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 $Q_{\text{к}} = -Lm$.

От теории к практике

В ходе эксперимента был построен график зависимости температуры вещества от абсолютной величины выделенного им в процессе теплообмена количества теплоты (рис. 76). В момент начала отсчёта времени в сосуде находился только газ, а его давление в ходе всего процесса оставалось постоянным. Какие изменения температуры и внутренней энергии вещества происходили на каждом участке графика?

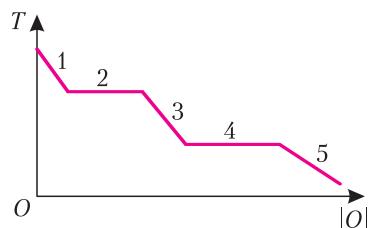


Рис. 76

Удельная теплота сгорания топлива. Физическую величину, численно равную количеству теплоты, выделяющемуся при полном сгорании топлива массой 1 кг, называют *удельной теплотой сгорания* q топлива и измеряют в джоулях, делённых на килограмм $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$. Количество теплоты, выделившееся при полном сгорании некоторой массы m топлива, определяют по формуле

$$Q_{\text{ср}} = qm.$$

Это количество теплоты передаётся телам, образующим термодинамическую систему, и по отношению к ним является положительной величиной.

От теории к практике

Источником тепла в доме, где не установлено газовое оборудование, является печь. Какой вид топлива наиболее эффективен (см. таблицу) для печного отопления? Почему?

Вещество	древа сухие	торф в брикетах	бурый уголь	каменный уголь
Удельная теплота сгорания топлива q , $10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	8,3	15,0	9,3	30,3



Теплообмен — самопроизвольный процесс передачи внутренней энергии от тела с большей температурой телу с меньшей температурой без совершения работы

При теплообмене не происходит превращения энергии из одной формы в другую: часть внутренней энергии более нагретого тела передаётся менее нагретому

Количество теплоты является количественной мерой энергии, переданной телу в процессе теплообмена

Количество теплоты, сообщаемое при нагревании тела (выделяющееся при охлаждении):

$$Q = cm(T_2 - T_1)$$

Количество теплоты, необходимое для плавления твёрдого тела, находящегося при температуре плавления:

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m$$

Количество теплоты, выделяющееся при кристаллизации жидкости:

$$Q_{\text{кр}} = -\lambda m$$

Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости, находящейся при температуре кипения, в пар:

$$Q_{\text{п}} = Lm$$

Количество теплоты, выделяющееся при конденсации пара:

$$Q_{\text{к}} = -Lm$$

Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании топлива:

$$Q_{\text{ср}} = qm$$



- Объясните изменение внутренней энергии тела при теплообмене и совершении работы.
- Какая физическая величина является мерой изменения внутренней энергии тел при теплообмене?
- Что называют удельной теплоёмкостью вещества? В каких единицах её измеряют?
- Что называют удельной теплотой плавления вещества? В каких единицах её измеряют?
- При плавлении кристаллического вещества, несмотря на подводимую энергию, его температура не изменяется. На что расходуется количество теплоты, сообщаемое телу?
- Что называют удельной теплотой парообразования вещества? В каких единицах её измеряют?

7. Почему, несмотря на отводимую энергию, температура вещества на участке 2 (см. рис. 76) не изменяется?

8. Что называют теплотой сгорания топлива? В каких единицах её измеряют?

Домашняя лаборатория

1. Когда вы берёте в руки металлические ножницы, то они кажутся холоднее окружающего воздуха. Имея только бытовой термометр и сосуд с водой, предложите опыт, который позволит проверить, так ли это. Проведите этот опыт.

2. Используя бытовой термометр, выясните, в каком случае естественное перемешивание воды произойдёт быстрее: если в горячую воду наливать холодную или в холодную наливать горячую (объёмы воды в обоих случаях одинаковые). Объясните полученный результат.

Примеры решения задач

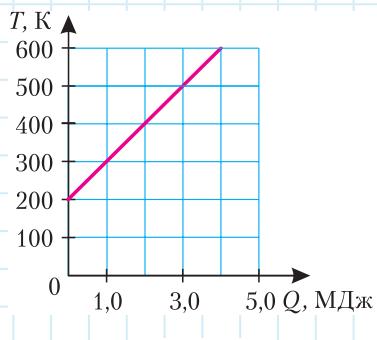


Рис. 77

Пример 1. На рисунке 77 представлен график зависимости абсолютной температуры нагреваемого тела от переданного ему количества теплоты. Воспользовавшись таблицей на с. 84, определите вещество, из которого изготовлено тело, если его масса $m = 40$ кг.

Решение. Для того чтобы определить вещество, из которого изготовлено тело, найдём его удельную теплоёмкость c . Анализируя график, делаем вывод, что при нагревании тела от температуры $T_1 = 200$ К до температуры $T_2 = 600$ К ему было передано количество теплоты $Q = 4,0 \cdot 10^6$ Дж, которое можно рассчитать по формуле $Q = cm(T_2 - T_1)$.

Следовательно, удельная теплоёмкость вещества $c = \frac{Q}{m\Delta T}$.

$$c = \frac{4,0 \cdot 10^6 \text{ Дж}}{40 \text{ кг} \cdot (600 \text{ К} - 200 \text{ К})} = 0,25 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Полученное значение удельной теплоёмкости соответствует олову.

Ответ: $c = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — олово.

Пример 2. В налитую в сосуд воду, масса которой $m_1 = 800 \text{ г}$ и температуре $t_1 = 60^\circ\text{C}$, 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 и потерями тепла 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. Пренебрегая потерями энергии в окружающую среду, учитываем только обмен энергией между входящими в систему телами. Рассмотрим тепловые процессы, происходившие 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) таяние льда: $Q_2 = \lambda m_2$; 3) нагревание воды, появившейся при таянии льда, от температуры t_0 до температуры t_3 : $Q_3 = c_1 m_2 (t_3 - t_0)$; 4) остывание 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

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

Откуда масса льда:

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

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

Ответ: $m_2 = 0,13 \text{ кг.}$

Упражнение 9

1. Чтобы увеличить температуру воды, масса которой $m_1 = 230$ г, на $\Delta T_1 = 30,0$ К, необходимо такое же количество теплоты, как и для увеличения температуры железного бруска на $\Delta T_2 = 50,0$ К. Определите массу бруска.

Удельные теплоёмкости: воды $c_1 = 4,20 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, железа $c_2 = 4,60 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

2. Жидкое олово при температуре плавления $t_1 = 232$ °С влили в воду массой $m_2 = 2,0$ кг, температура которой $t_2 = 12$ °С. В результате температура воды повысилась до $t = 32$ °С. Определите массу олова. Теплообменом с окружающей средой, теплоёмкостью сосуда, в котором находилась вода, и испарением воды пренебречь. Удельные теплоёмкости: олова $c_1 = 0,25 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, воды

$c_2 = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; удельная теплота плавления олова $\lambda_1 = 60,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

3. В теплоизолированном сосуде, теплоёмкостью которого можно пренебречь, находится вода массой $m_1 = 0,40$ кг при температуре $t_1 = 10$ °С. В воду впускают сухой водяной пар массой $m_2 = 50$ г, температура которого $t_2 = 100$ °С. Определите установившуюся температуру воды в сосуде. Для воды:

удельная теплоёмкость $c = 4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удельная теплота парообразования

$$L = 2,26 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

4. В теплоизолированном сосуде, теплоёмкостью которого можно пренебречь, находится вода объёмом $V_1 = 3,2$ л при температуре $t_1 = 20$ °С. В воду опускают стальной бруск массой $m_2 = 4,0$ кг, нагретый до температуры $t_2 = 360$ °С. В результате теплообмена вода нагрелась до температуры $t_3 = 50$ °С, а часть её обратилась в пар. Определите массу воды, обратившейся

в пар. Для воды: удельная теплоёмкость $c_1 = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, плотность

$\rho_1 = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, удельная теплота парообразования $L_1 = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, тем-

пература кипения $t_{\kappa} = 100$ °С. Удельная теплоёмкость стали $c_2 = 4,6 \cdot 10^2 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

5. В калориметр налили воду при температуре $t = 12$ °С. При проведении первого опыта в воду поместили лёд массой $m_1 = 0,10$ кг, а при проведении второго — лёд массой $m_2 = 0,20$ кг. В обоих опытах лёд был взят при температуре плавления. Определите установившуюся в калориметре температуру, если и в первом, и во втором опытах она была одинаковая.



§ 14. Первый закон термодинамики.

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам изменения состояния идеального газа

В 9-м 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?

Закон сохранения энергии. В середине XIX в. известный английский физик Дж. Джоуль (1818–1889), проведя многочисленные опыты, показал, что совершая 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 в. Г. Гельмгольца (1821–1894) позволили сформулировать закон *сохранения и превращения энергии*, распространив его на все явления природы.

Закон сохранения и превращения энергии: 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.

Закон сохранения и превращения энергии является всеобщим законом природы и связывает воедино все физические явления. Этот закон выполняется абсолютно точно, на нём базируется всё современное естествознание.

От теории к практике

Если бутылку, заполненную до половины водой при комнатной температуре, встряхивать в течение нескольких минут, то окажется, что вода нагрелась на 1–2 °С. Что является причиной повышения температуры воды?

Первый закон термодинамики. В предыдущих параграфах мы рассматривали процессы, в которых внутренняя энергия системы изменялась или при совершении работы, или в результате теплообмена. Однако чаще всего при переходе системы из одного состояния в другое внутренняя энергия изменяется как за счёт совершения работы, так и за счёт теплообмена с окружающими телами.

Для термодинамических систем закон сохранения и превращения энергии называют *первым законом термодинамики*.

Первый закон 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.

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

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 против внешних сил:

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

От теории к практике

Идеальный газ получил количество теплоты $Q = 340$ Дж. Каково приращение внутренней энергии газа, если при этом сила давления газа совершила работу $A = 300$ Дж?



$$V_1 = V_2$$

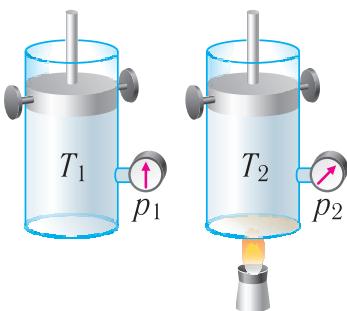


Рис. 78

Применим первый закон термодинамики к различным изопроцессам изменения состояния идеального одноатомного газа.

Рассмотрим в качестве термодинамической системы идеальный одноатомный газ, находящийся в цилиндрическом сосуде, закрытом поршнем.

Изохорный процесс. Если сосуд закрыт неподвижным поршнем, то при нагревании объём газа остаётся постоянным ($V = \text{const}$ и $\Delta V = 0$) (рис. 78). Следовательно, работа силы давления газа $A = 0$. Тогда первый закон термодинамики примет вид:

$$Q = \Delta U.$$



При изохорном процессе всё передаваемое газу количество теплоты идёт на увеличение его внутренней энергии:

$$\Delta U = \frac{3}{2}vR\Delta T > 0.$$

Если газ при изохорном процессе отдаёт количество теплоты, то его внутренняя энергия убывает: $\Delta U < 0$.

От теории к практике

Каково приращение внутренней энергии идеального газа, если при изохорном процессе от него было отведено количество теплоты $Q = -560$ Дж?



Изотермический процесс. Поместим сосуд с газом, находящимся под подвижным поршнем, в терmostат — устройство, в котором поддерживается постоянная температура (рис. 79). С помощью внешнего устройства медленно переместим поршень в сосуде так, чтобы объём газа увеличился (или уменьшился). Значения температуры газа в начальном и конечном состояниях одинаковы. В этом случае внутренняя энергия идеально-го одноатомного газа $U = \frac{3}{2}vRT$ остаётся постоянной, а её изменение $\Delta U = 0$. Тогда первый закон термодинамики примет вид:

$$Q = A.$$

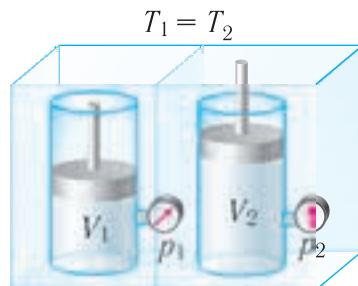


Рис. 79

При изотермическом процессе переданное газу количество теплоты расходуется на совершение газом работы.



От теории к практике

Сила давления идеального газа при изотермическом расширении совершила работу $A = 3640$ Дж. Какое количество теплоты получил газ?



Изобарный процесс. Если сосуд закрыт подвижным поршнем, то при нагревании увеличится как температура газа, так и его объём (рис. 80). Тогда первый закон термодинамики имеет вид:

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

При изобарном процессе переданное газу количество теплоты частично расходуется на

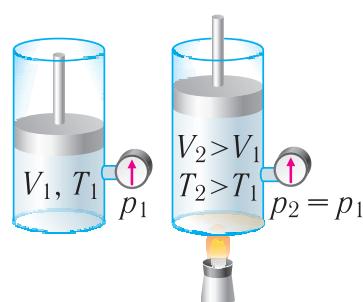


Рис. 80



увеличение внутренней энергии системы и частично идёт на совершение работы силой давления газа при его расширении.

С учётом того, что при изобарном процессе работа расширения (сжатия) газа $A = p\Delta V \neq 0$, первый закон термодинамики примет вид:

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

От теории к практике

Сила давления идеального газа при изобарном расширении совершила работу $A = 320$ Дж. При этом газ получил количество теплоты $Q = 680$ Дж. Каково приращение внутренней энергии идеального газа?



Изменение 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:

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

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 против внешних сил: $Q = \Delta U + A$

При изохорном процессе всё передаваемое системе количество теплоты идёт на увеличение её внутренней энергии:
 $Q = \Delta U$

При изотермическом процессе работа расширения или сжатия идеального газа сопровождается теплообменом между газом и терmostатом:
 $A = Q$

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





1. Приведите две формулировки первого закона термодинамики.
2. Чему равно изменение внутренней энергии при изохорном процессе?
3. На что расходуется количество теплоты, сообщаемое системе при изотермическом процессе?
4. На что расходуется количество теплоты, сообщаемое системе при изобарном процессе?
5. 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?
6. Заполните таблицу в тетради.

Процесс	Работа силы давления газа	Количество теплоты	Изменение внутренней энергии	Вывод
Изохорный ($V = \text{const}$ и $\Delta V = 0$)				
Изотермический ($T = \text{const}$ и $\Delta T = 0$)				
Изобарный ($p = \text{const}$)				



Примеры решения задач

Пример 1. 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 им в этом процессе.

Дано:

$$\begin{aligned} p &= 2,0 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ \Delta V &= 0,40 \text{ м}^3 \\ p &= \text{const} \end{aligned}$$

$$\Delta U - ?$$

$$Q - ?$$

Решение. Приращение внутренней энергии идеально-го 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 $\frac{m}{M} R \Delta T = p \Delta V$.

Тогда $\Delta U = \frac{3}{2} p \Delta V$. Согласно первому закону термодинамики для изобарного процесса $Q = \Delta U + p \Delta V$.

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

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

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

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

Пример 2. На рисунке 81 представлен график процесса изменения состояния некоторой массы идеально-го газа (участок $2 \rightarrow 3$ — изотерма). На каком участке графика работа силы давления газа: а) положительная; б) отрицательная? На каком участке графика газ: а) получал количество теплоты; б) отдавал? Как изменялась внутренняя энергия газа?

Решение. Участок $1 \rightarrow 2$. Поскольку при постоянном давлении ($p = \text{const}$, $p_1 = p_2$) увеличивается объём газа ($\Delta V_{12} > 0$), то растёт и его температура ($\Delta T_{12} > 0$). Следовательно, работа силы давления газа $A_{12} > 0$ и приращение его внутренней энергии $\Delta U_{12} > 0$. Из первого закона термодинамики, записанного в виде $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$, следует, что $Q_{12} > 0$.

Участок $2 \rightarrow 3$. Поскольку температура газа не изменяется ($T = \text{const}$, $T_2 = T_3$, $\Delta T_{23} = 0$), то приращение его внутренней энергии $\Delta U_{23} = 0$. Объём газа уменьшается (изотермическое сжатие), и работа силы давления газа $A_{23} < 0$. Из первого закона термодинамики, записанного в виде $Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23}$, следует, что $Q_{23} < 0$.

Ответ:

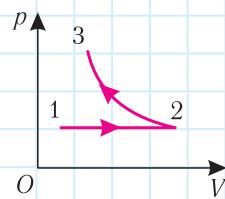


Рис. 81

Участок графика	Работа силы давления газа	Количество теплоты	Приращение внутренней энергии газа
$1 \rightarrow 2$	$A_{12} > 0$	$Q_{12} > 0$ (газ получал количество теплоты)	$\Delta U_{12} > 0$
$2 \rightarrow 3$	$A_{23} < 0$	$Q_{23} < 0$ (газ отдавал количество теплоты)	$\Delta U_{23} = 0$



Упражнение 10

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

2. С идеальным газом определённой массы осуществлён процесс, график которого представлен на рисунке 82. Чему равна работа силы давления газа? Получал или отдавал газ количество теплоты в этом процессе? Как изменилась внутренняя энергия газа?

Заполните таблицу в тетради (см. пример 2).

Работа силы давления газа	Количество теплоты	Приращение внутренней энергии газа

3. С идеальным газом определённой массы осуществлён процесс, график которого представлен на рисунке 83. Определите приращение внутренней энергии газа, если он отдал количество теплоты $Q_{12} = -2,25 \text{ кДж}$.

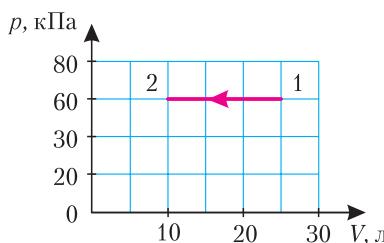


Рис. 83

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



§ 15. Термовые двигатели. Принцип действия термовых двигателей и их КПД. Экологические проблемы использования термовых двигателей

Люди давно заметили, что при совершении механической работы внутренняя энергия тел может изменяться, и научились это использовать. Например, можно согреть руки, потерев ладони друг о друга, или добыть огонь трением одного куска дерева о другой. Гораздо больший промежуток времени понадобился человечеству, чтобы научиться использовать убыль внутренней энергии тел для совершения механической работы. Только во второй половине XVIII в., сравнительно недавно по историческим меркам, появились первые практически полезные универсальные устройства для осуществления этой цели — паровые машины. Изобретение паровой машины, а впоследствии и двигателя внутреннего сгорания имело исключительно важное значение. Сейчас трудно представить нашу жизнь без автомобилей, самолётов, кораблей и других устройств, в которых убыль внутренней энергии сжигаемого топлива и его окислителя частично преобразуется в механическую работу.

Необратимость процессов в природе. Первый закон термодинамики допускает самопроизвольный переход энергии как от более нагревого тела к менее нагревому, 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 нагревого к более нагревому 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. Как вы не раз убеждались на практике, всегда некоторое количество теплоты самопроизвольно переходит от горячего чая к холодной ложке, пока в системе «чай—ложка» не установится тепловое равновесие с одинаковой температурой во всех частях системы.

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

Второй закон термодинамики констатирует тот факт, что *количество теплоты самопроизвольно может переходить только от более нагревых тел к менее нагревым*.

Этот научный факт и определяет единственно возможное направление самопроизвольного протекания тепловых процессов — они идут в направлении к состоянию теплового равновесия.

Тепловые двигатели.

Тепловые двигатели — двигатели, в которых происходит превращение части внутренней энергии сжигаемого топлива в механическую работу.

В качестве упрощённой модели теплового двигателя рассмотрим цилиндр, в котором находится газ (воздух) под поршнем. Поместим на поршень тело массой m и будем нагревать газ в цилиндре (рис. 84, а). Давление газа увеличивается, поршень приходит в движение и поднимает тело на некоторую высоту Δh (рис. 84, б). При этом объём газа увеличивается, т. е. сила давления газа совершает работу ($A > 0$). Однако в данном случае устройству свойственно одноразовое выполнение работы, поэтому такие устройства малопригодны.

Рабочее тело — тело, совершающее работу 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. Таким образом, **первый принцип действия тепловых двигателей** — цикличность (непрерывность) их работы.

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 такой 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. Поэтому **второй принцип действия тепловых двигателей** — сжатие газа должно происходить при более низкой температуре T_2 , чем его расширение (рис. 85). В этом случае полная работа газа за цикл положительная ($A > 0$) и численно равна площади фигуры $S_{ABCD} = S_{ABEF} - S_{DCEF}$.

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 двигателя кроме

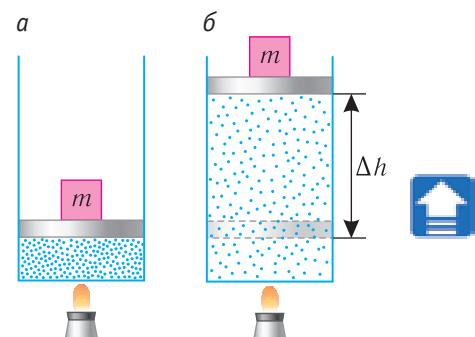


Рис. 84

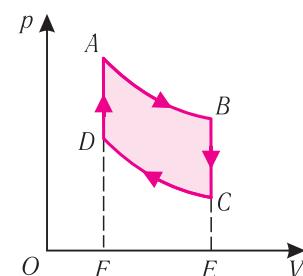


Рис. 85

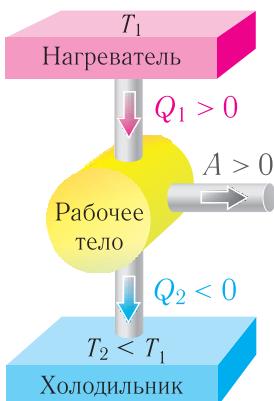


Рис. 86



нагревателя и рабочего тела необходимо наличие холодильника.

Схема теплового двигателя представлена на рисунке 86. 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.

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

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

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**.

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя — отношение работы $A_{\text{ц}}$, совершаемой рабочим телом за цикл, к количеству теплоты Q_1 , полученному им от нагревателя:

$$\eta_t = \frac{A_{\text{ц}}}{Q_1}.$$

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

$$\eta_t = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}. \quad (15.1)$$

Из формулы (15.1) 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 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 Δt сожжено топливо массой m , имеющее удельную теплоту сгорания q , то

$$\eta_e = \frac{P\Delta t}{qm}.$$

Значение тепловых двигателей и экологические проблемы их использования. Наибольшее значение имеет использование тепловых двигателей в энергетике и на транспорте. Тепловые двигатели — паровые турбины (рис. 87) — 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 (рис. 88, а) — на теплоходах, тепловозах, тракторах, тяжёлых автомобилях. Создание реактивного двигателя (рис. 88, б) позволило поднять самолёты на большую высоту, увеличить скорость и дальность их полётов.



Рис. 87

*a**б*

Рис. 88

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

В процессе работы 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:

а) в 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.



Количество теплоты самопроизвольно может переходить только от более нагретых тел к менее нагретым

Двигатели, в которых происходит превращение части внутренней энергии сжигаемого топлива в механическую работу, называют тепловыми двигателями

Первый принцип действия тепловых двигателей — цикличность (непрерывность) их работы

Второй принцип действия тепловых двигателей — сжатие газа должно происходить при более низкой температуре, чем его расширение

Тепловой двигатель состоит из нагревателя, рабочего тела и холодильника

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя — отношение работы, совершающейся рабочим телом за цикл, к количеству теплоты, полученному им от нагревателя:

$$\eta_t = \frac{A_u}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$





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. 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, $Q_2 = -1,2 \text{ кДж}$.

Дано:

$$\eta_t = 20\%$$

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

$$A_{\text{ц}} = ?$$

Решение. Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя

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

где Q_1 — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя. Следовательно,

$$Q_1 = \frac{|Q_2|}{1 - \eta_t}.$$

$$\text{Таким образом, } A_{\text{ц}} = \eta_t Q_1 = \frac{\eta_t |Q_2|}{1 - \eta_t}.$$

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

Ответ: $A_{\text{ц}} = 0,30 \text{ кДж.}$

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 $\eta_e = 24\%$. Плотность и удельная теплота сгорания керосина $\rho = 8,0 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $q = 4,3 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ соответственно.

Дано:

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

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

$$\eta_s = 24\%$$

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

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

$$V - ?$$

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

Решение. По определению, эффективный коэффициент полезного действия $\eta_s = \frac{A_{\text{полезн}}}{Q_{\text{полн}}}$, 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 $\eta_s = \frac{4 \langle F \rangle s}{q\rho V}$, откуда $V = \frac{4 \langle F \rangle s}{\eta_s q\rho}$.

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

Упражнение 11

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

2. 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.

3. 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 $\eta_s = 25\%$. Плотность и удельная теплота сгорания бензина $\rho = 7,1 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $q = 46 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ соответственно.

4. Для работы двигателя электрогенератора, эффективный коэффициент полезного действия которого $\eta_s = 20,0\%$, запасена цистерна дизельного топлива объёмом $V = 62,0 \text{ м}^3$. Определите, на сколько рабочих дней хватит запасённого топлива, если средняя мощность двигателя во время работы $\langle P \rangle = 150$ кВт и продолжительность рабочего дня двигателя $t = 7,00$ ч. Плотность и удельная теплота сгорания дизельного топлива $\rho = 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и $q = 42,0 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ соответственно.



Обобщение и систематизация знаний

ОСНОВЫ

Внутренняя энергия макроскопического тела — алгебраическая сумма кинетической энергии теплового движения всех частиц, образующих тело, и потенциальной энергии их взаимодействия

Изменение внутренней энергии идеального газа при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое зависит только от значений параметров этих состояний и не зависит от процесса перехода

Внутренняя энергия и её изменение для данной массы идеального одноатомного газа

$$U = \frac{3}{2} kTN = \frac{3}{2} kT v N_A =$$

$$= \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT = \frac{3}{2} pV$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} v R \Delta T = \frac{3}{2} \Delta(pV) =$$

$$= \frac{3}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1)$$

$$Q = \Delta U + A$$

$$p = \text{const}$$

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

$$V = \text{const} \Rightarrow$$

$$A = 0$$

$$Q = \Delta U$$

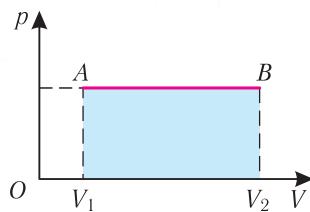
Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя

$$\eta_t = \frac{A_u}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1}$$

ТЕРМОДИНАМИКИ

Работа, совершенная над рассматриваемым телом, есть работа сил, приложенных к этому телу со стороны всех остальных (внешних) тел, с которыми оно взаимодействует, и осуществляющих передачу энергии

Сила давления газа и внешние силы совершают работу только в процессе изменения объёма газа. Работа газа численно равна площади фигуры, ограниченной графиком зависимости давления от объёма, осью OV и прямыми, соответствующими значениям объёма V_1 и V_2 . Площадь фигуры (работа газа) зависит от вида процесса



При изобарном процессе ($p = \text{const}$)
 $A = p\Delta V$

Первый закон термодинамики

Тепловые двигатели

Эффективный коэффициент полезного действия теплового двигателя

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

Количество теплоты — количество внутренней энергии, которой тело обменивается с окружающей средой при теплообмене — самопроизвольном процессе передачи энергии от тела с большей температурой телу с меньшей температурой без совершения работы

$$Q = qm$$

$$Q = cm(T_2 - T_1)$$

$$Q_{\text{п}} = Lm, \\ Q_{\text{к}} = -Lm$$

$$Q_{\text{пл}} = \lambda m, \\ Q_{\text{кр}} = -\lambda m$$

Теплообмен
при переходе из одного состояния в другое

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

$$T = \text{const} \Rightarrow \Delta U = 0 \\ Q = A$$



Задания для самоконтроля

1. Определите отношение внутренней энергии неона к внутренней энергии гелия, количество вещества которых $v_{\text{He}} = 1$ моль и $v_{\text{Ne}} = 3$ моль, если они находятся при одинаковой температуре.

2. На рисунке 89 представлен график процесса перехода идеального одноатомного газа из состояния 1 в состояние 2. Определите приращение внутренней энергии газа в этом процессе.

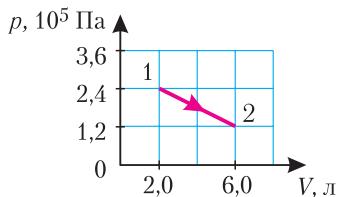


Рис. 89

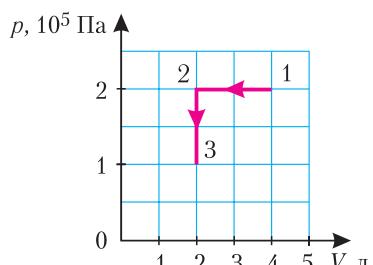


Рис. 90

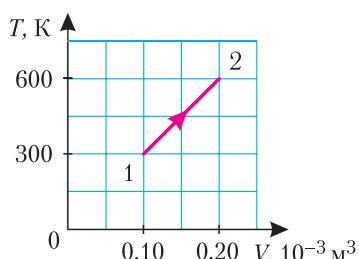


Рис. 91

8. Гелий, взятый в количестве $v = 2,00$ моль, изобарно расширяется. При этом сила давления газа совершают работу $A = 7,20 \text{ кДж}$. Концентрация атомов

3. На рисунке 90 представлен график процесса перехода идеального одноатомного газа определённой массы из состояния 1 в состояние 3. Определите отношение значений внутренней энергии газа в начальном и конечном состояниях.

4. В баллоне находится идеальный одноатомный газ, количество вещества которого $v = 2,4$ моль, температура $T_1 = 420 \text{ К}$. В результате изохорного перехода из одного состояния в другое давление газа уменьшилось от $p_1 = 860 \text{ кПа}$ до $p_2 = 655 \text{ кПа}$. Определите приращение внутренней энергии газа.

5. При изобарном сжатии азота N_2 внешняя сила совершила работу $A' = 400 \text{ Дж}$. При этом абсолютная температура газа уменьшилась от $T_1 = 480 \text{ К}$ до $T_2 = 300 \text{ К}$. Определите массу азота.

6. График циклического процесса в идеальном газе представляет собой отрезки прямых, соединяющие точки с координатами $A (1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; 1,5 \text{ л})$, $B (1,8 \cdot 10^5 \text{ Па}; 4,5 \text{ л})$ и $C (0,60 \cdot 10^5 \text{ Па}; 1,5 \text{ л})$. Определите работу, совершенную силой давления газа за цикл.

7. На рисунке 91 представлен график расширения идеального газа, взятого в количестве $v = 1,0$ моль. Определите работу, совершенную силой давления газа при его переходе из состояния 1 в состояние 2.

газа в конечном состоянии в $\alpha = 3,00$ раза меньше, чем в начальном, а его масса не меняется. Определите начальную температуру гелия.

9. На рисунке 92 представлены графики зависимости температуры от времени для твёрдых кристаллических тел *A* и *B*. Полезная мощность нагревателей в обоих случаях одинаковая, а потерями энергии можно пренебречь. Выберите два верных утверждения.

1) Температура тела *A* растёт в четыре раза быстрее, чем температура тела *B*.

2) Тело *A* получает в два раза большее количество теплоты, чем тело *B*.

3) Тела *A* и *B* могут состоять из одного вещества, но масса m_A тела *A* вдвое меньше массы m_B тела *B*.

4) Тела *A* и *B* могут иметь одинаковую массу, но удельная теплоёмкость c_A тела *A* в твёрдом состоянии вдвое меньше удельной теплоёмкости c_B тела *B* в твёрдом состоянии.

5) Тела *A* и *B* могут иметь одинаковую массу, но удельная теплоёмкость c_A тела *A* в твёрдом состоянии вдвое больше удельной теплоёмкости c_B тела *B* в твёрдом состоянии.

10. Железный осколок падает из состояния покоя с высоты $h = 800$ м. Модуль скорости движения осколка в момент падения на поверхность Земли $v = 35 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Определите приращение температуры осколка за время падения. Удельная теплоёмкость железа $c = 460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Потерями энергии в окружающую среду пренебречь.

11. В теплоизолированный сосуд с водой, масса и температура которой $m_{\text{в}} = 1,6$ кг и $t_{0\text{в}} = 8,0$ °С соответственно, опустили кусок льда массой $m_{\text{л}} = 0,80$ кг. После того как установилось тепловое равновесие, оказалось, что масса льда увеличилась на $\Delta m = 20$ г. Определите начальную температуру льда.

Удельная теплоёмкость воды $c_{\text{в}} = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; для льда: удельная теплоёмкость $c_{\text{л}} = 2,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$, удельная теплота плавления $\lambda = 3,4 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, температура плавления $t_{\text{пл}} = 0$ °С. Теплоёмкостью сосуда пренебречь.

12. В теплоизолированном сосуде находится вода массой $m_1 = 1,2$ кг, температура которой $t = 0$ °С. Из сосуда откачивают влажный воздух, в результате чего вода в сосуде кристаллизуется. Определите массу образовавшегося льда. Удельная теплота парообразования воды при температуре $t = 0$ °С составляет $L = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, а удельная теплота плавления льда $\lambda = 3,4 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

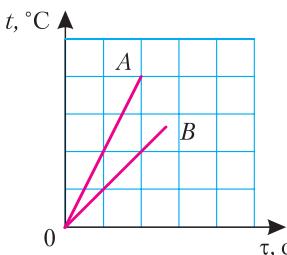


Рис. 92

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

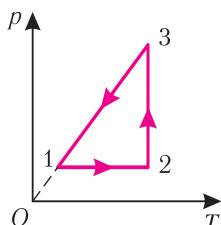


Рис. 93

14. При изобарном расширении гелия массой $m = 20$ г его объём увеличился в $\alpha = 2,0$ раза. Начальная температура гелия $T_1 = 300$ К. Определите работу, совершенную силой давления газа при его расширении, и полученное газом количество теплоты.

15. С идеальным газом определённой массы осуществлён процесс, график которого представлен на рисунке 93. Определите: а) на каких участках графика работа газа положительная; б) на каких участках графика газ получал энергию, а на каких — отдавал. Заполните таблицу в тетради.

Участок графика	Работа силы давления газа	Количество теплоты	Приращение внутренней энергии газа
$1 \rightarrow 2$			
$2 \rightarrow 3$			
$3 \rightarrow 1$			



Темы проектных заданий по разделу «Молекулярная физика»

1. Порядок и хаос в мире молекул.
2. Роль диффузии в природе.
3. Измерение температуры и зависимость её значения от внешних факторов.
4. Кристаллы в природе и жизни человека.
5. Испарение и конденсация в природе.
6. Значение испарения в жизни живых существ.
7. Влажность воздуха и её влияние на здоровье человека.
8. Природные явления: образование тумана и выпадение росы.
9. Тепловые двигатели и их влияние на окружающую среду.
10. Автомобильный транспорт и экология.
11. Эволюция автомобильных двигателей.
12. Вечный двигатель: миф или реальность.





Все известные физические явления связаны с тем или иным взаимодействием тел или частиц. Например, движение Луны вокруг Земли, падение тел на поверхность Земли, отклонение отвеса от вертикального направления вблизи массивной горы обусловлены гравитационным взаимодействием этих тел. Гравитационному взаимодействию подвержены все тела, однако заметным оно становится только тогда, когда хотя бы одно из взаимодействующих тел обладает достаточно большой массой.

Молекулы любого вещества также участвуют во взаимном притяжении, обусловленном силами всемирного тяготения. Но поскольку массы молекул очень малы, этим взаимодействием обычно пренебрегают. Притяжение и отталкивание молекул, обеспечивающие существование твёрдых и жидкких тел, имеют совсем другую природу — электромагнитную.

Электромагнитное взаимодействие осуществляется посредством особого вида материи — **электромагнитного поля** — совокупности двух взаимосвязанных полей: электрического и магнитного.

Электромагнитное взаимодействие проявляется во всех электрических, магнитных и оптических явлениях. Благодаря ему вы видите окружающий мир, так как свет — одно из проявлений электромагнитного поля. Этим же взаимодействием обусловлены силы упругости и силы трения, известные вам из механики. Электромагнитное взаимодействие определяет свойства веществ в различных агрегатных состояниях и их химические превращения. Поскольку молекулярные силы электромагнитные по природе, то практически все биологические явления обусловлены электромагнетизмом.

Электродинамика — раздел физики, в котором изучают электромагнитное взаимодействие между электрически заряженными телами и частицами.

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 электрическими зарядами, особенностями упорядоченного движения заряженных частиц, физическими величинами, характеризующими электрические и магнитные поля.

В 10-м классе в разделе «Электродинамика» вам предстоит изучить следующие темы: «Электростатика», «Постоянный электрический ток», «Магнитное поле. Электромагнитная индукция» и «Электрический ток в различных средах».



ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОСТАТИКА



Электростатика — раздел электродинамики, в котором изучают взаимодействие *неподвижных* в некоторой инерциальной 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.

Фундаментом электростатики являются 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).

§ 16. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда

Что означает наличие электрического заряда у тела или частицы? Как взаимодействуют электрически заряженные тела?

Электрический заряд. О том, что янтарь, потёртый о шерсть, приобретает свойство притягивать лёгкие предметы (рис. 94), знали ещё древние греки. Однако только в 1600 г. лейб-медик королевы Англии доктор медицины Уильям Гильберт в книге «О магните, магнитных телах и большом магните — Земле»

дал первое систематизированное описание свойств электрических и магнитных материалов. Гильберт продемонстрировал, что кроме янтаря свойством притягивать лёгкие предметы обладают после натирания алмаз, сера, фарфор и многие другие тела. Он назвал их «электрическими» (ελεκτρον по-гречески — янтарь). Теперь мы говорим, что такие тела электрически заряжены, т. е. им сообщён электрический заряд.



Рис. 94

Электрический заряд — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц).

Электрический заряд, как и масса, не существует без тела или частицы, а заряд любой системы тел (частиц) равен сумме зарядов тел (частиц), входящих в систему.

Существуют два вида электрических зарядов, которые условились называть положительными и отрицательными. Причём при взаимодействии одноимённо заряженные тела (частицы) отталкивают друг друга (рис. 95, *a*), а разноимённо заряженные — притягивают друг друга (рис. 95, *b*).

Заряды разных тел (частиц) могут отличаться не только знаками, но и числовыми значениями.

За единицу электрического заряда в СИ принят кулон (Кл). Эта единица названа в честь Шарля Кулона (1736–1806). 1 Кл — величина электрического заряда, проходящего через поперечное сечение проводника за промежуток времени 1 с при силе постоянного тока 1 А.

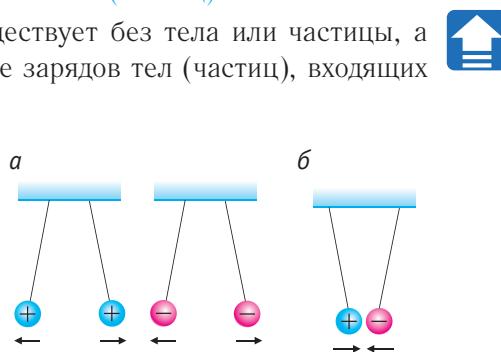


Рис. 95

Интересно знать

Один кулон — очень большая величина заряда. Расчёты показывают, что на удалённом от всех остальных тел металлическом шаре, находящемся в сухом воздухе, может находиться избыточный заряд 1 Кл, если его диаметр не менее 110 м. Вместе с тем при включении автомобильных фар сила тока в цепи приблизительно 10 А, т. е. ежесекундно через поперечное сечение проводников, подсоединённых к фарам, проходит заряд приблизительно 10 Кл.

Элементарный заряд. На рубеже XIX и XX столетий учёные экспериментально установили, что в природе существует электрический заряд, модуль которого минимален. Этот заряд назвали **элементарным**. Вы знаете, что ядра всех атомов содержат протоны, которые являются носителями положительного элементарного заряда, а сами атомы содержат электроны, являющиеся носителями отрицательного элементарного заряда. Учёные с точностью порядка $\sim 10^{-20}$ установили равенство модулей зарядов электрона и протона.

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 тела q 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 $q_1 = 5e$, отличается от нейтрального тела недостатком пяти электронов, а тело, заряд которого $q_2 = -13e$, — избытком тринадцати электронов.

От теории к практике

Мы отмечали, что 1 Кл — это очень большой заряд. Какому избытку (недостатку) электронов в теле соответствует этот заряд?



Интересно знать

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. Так как масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, то это вызывает изменение массы одного моля заряженного тела не более чем на $9 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 1 \cdot 10^{10} = 9 \cdot 10^{-21}$ кг по сравнению с массой нейтрального тела. Такое изменение массы, конечно, можно не учитывать.

Закон сохранения электрического заряда. Вы знаете, что при трении со-прикасающиеся тела электризуются, при этом модули противоположных по

знаку зарядов, возникших на телах, равны. Проверим это на опыте. Наэлектризуем трением соприкасающиеся друг с другом эbonитовую палочку и кусочек меха или шерстяной ткани. Поместим поочерёдно внутрь металлической сферы, укреплённой на стержне электрометра, эbonитовую палочку (рис. 96, *a*) и кусочек меха (рис. 96, *b*). Стрелка электрометра отклонится, причём, как в первом, так и во втором случаях, на одинаковые углы. Если

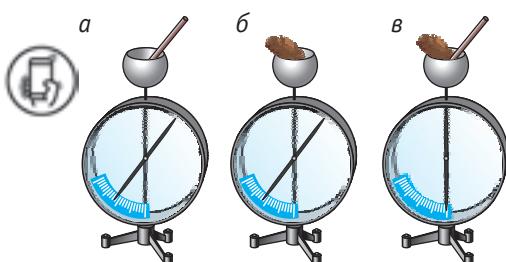


Рис. 96

* Исключением является водород, у которого ядра атомов — протоны.

же одновременно опустить внутрь сферы эbonитовую палочку и кусочек меха (рис. 96, 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.

Принято считать систему тел (частиц) *электрически изолированной*, если между ней и внешними телами нет обмена электрически заряженными частицами.

Закон сохранения электрического заряда указывает на важную особенность электрических явлений: электрические заряды всегда появляются парами. Так, например, при электризации трением тела приобретают заряды противоположных знаков, модули которых одинаковые.

От теории к практике

Можно ли при электризации трением зарядить только одно из соприкасающихся первоначально электронейтральных тел?



Электрический заряд — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц)

Электрические заряды существуют двух видов:
положительные
и отрицательные

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

Одноимённо заряженные частицы отталкиваются,
а разноимённо — притягиваются

Существует заряд, модуль которого минимален, называемый
элементарным: $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Закон сохранения электрического заряда: в электрически изолированной системе при любых взаимодействиях алгебраическая сумма электрических зарядов остаётся постоянной: $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$



Из истории физики

Закон сохранения электрического заряда впервые был сформулирован и экспериментально подтверждён М. Фарадеем в 1843 г.



1. Объясните электризацию тел при соприкосновении. Почему при электризации заряжаются оба тела?
2. Что характеризует электрический заряд?
3. Какие виды электрических зарядов существуют в природе? Как взаимодействуют одноимённо заряженные частицы? разноимённо заряженные?
4. Какой заряд называют элементарным?
5. В чём проявляется свойство дискретности электрического заряда?
6. Сформулируйте закон сохранения электрического заряда. Каковы условия применимости этого закона?



Упражнение 12

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 его электрический заряд.
3. Два одинаковых металлических шарика закреплены так, что расстояние между ними существенно больше их размеров (рис. 97). Определите, какой заряд окажется на таком же третьем шарике, если им сначала коснуться первого шарика, а затем второго. Первоначальные заряды шариков: $q_1 = 3e$; $q_2 = -8e$ и $q_3 = 5e$.

$$q_1 = 3e$$



$$q_2 = -8e$$



Рис. 97

4. Определите суммарный заряд всех протонов, содержащихся в воде объёмом $V = 10 \text{ см}^3$ (две чайные ложки).
5. Два одинаковых металлических шара, электрические заряды которых $q_1 = -4,0 \cdot 10^{-14}$ Кл и $q_2 = 2,0 \cdot 10^{-13}$ Кл, привели в соприкосновение. Определите число электронов, перешедших с первого шара на второй.



§ 17. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона

Электрически заряженные тела (частицы) взаимодействуют друг с другом. Но как определить силу, которой одно заряженное тело притягивает или отталкивает другое?

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).

Вспомните, закон всемирного тяготения также сформулирован для точечных тел (материальных точек).

Закон Кулона. Кулон детально исследовал взаимодействие неподвижных точечных зарядов. Он на опыте изучил зависимость сил электрического взаимодействия тел от модулей зарядов этих тел и расстояния между ними.

В своих опытах Кулон использовал специальный прибор — крутильные весы (рис. 98). 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 противовес 3. Шар 1 можно заряжать с помощью такого же проводящего шара 2. Он находится на изолирующем стержне, закреплённом 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 прибора, можно определить силу взаимодействия заряженных шаров.

Проведя большое количество опытов, Кулон установил, что модуль сил взаимодействия двух заряженных шаров $|F_{21}| = |F_{12}| = F$ обратно пропорционален квадрату расстояния между ними: $F \sim \frac{1}{r^2}$ и 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.

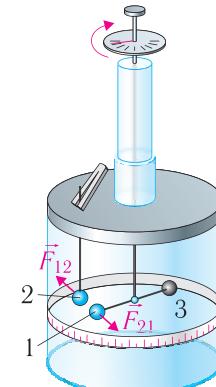


Рис. 98



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:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}, \quad (17.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц физических величин; $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули точечных зарядов; r — расстояние между ними.

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.

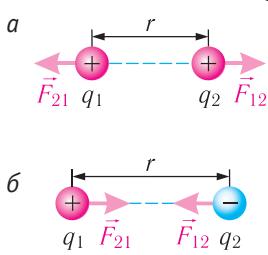


Рис. 99

Силы \vec{F}_{21} и \vec{F}_{12} взаимодействия неподвижных точечных зарядов (рис. 99) называют *кулоновскими силами*. В соответствии с третьим законом Ньютона эти силы противоположно направлены $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, а их модули равны. Отметим, что силы электростатического взаимодействия являются силами отталкивания для однотипных зарядов (рис. 99, а) и силами притяжения для разнотипных (рис. 99, б).

От теории к практике

Два маленьких положительно заряженных шарика закреплены на расстоянии r друг от друга. Как изменится модуль силы электростатического взаимодействия шариков, если: 1) уменьшить заряд каждого шарика в четыре раза; 2) увеличить расстояние между шариками в четыре раза; 3) увеличить заряд каждого шарика и расстояние между ними в два раза?

Как изменились бы силы электростатического взаимодействия шариков, если бы: 1) шарики были заряжены отрицательно; 2) один из шариков зарядить отрицательно, а другой положительно?



Взаимодействие системы точечных зарядов. Экспериментально 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, которыми каждый из этих зарядов в отдельности действует на заряд q_1 (принцип суперпозиции).

Используя принцип суперпозиции и закон Кулона, можно описать электростатическое взаимодействие любой системы точечных зарядов. На рисунке 100 представлены три взаимодействующих между собой точечных электрических заряда: $q_1 > 0$, $q_2 < 0$, $q_3 < 0$. Результирующей силы, действующей 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.

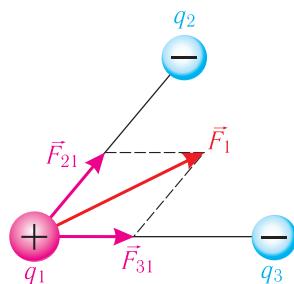
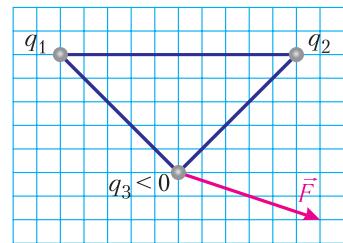


Рис. 100

От теории к практике

Точечные заряды q_1 , q_2 и q_3 закреплены в вершинах треугольника. Направление результирующей электростатической силы, действующей на отрицательный заряд q_3 со стороны зарядов q_1 и q_2 , представлено на рисунке 101. Каковы знаки зарядов q_1 и q_2 ?

Рис. 101



Интересно знать

Понятие электрического заряда в некоторой степени сходно с понятием гравитационной массы. Электрический заряд определяет интенсивность электромагнитных взаимодействий, а масса — гравитационных. Закон Кулона, описывающий электростатическое взаимодействие, формально похож на закон всемирного тяготения Ньютона, определяющий силы гравитационного взаимодействия:

$$|\vec{F}_{12}| = |\vec{F}_{21}| = F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

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 отталкивания (Ш. Кулон, 1785 г.) и гравитационной постоянной (Г. Кавендиш, 1788 г.) 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).

Диэлектрическая проницаемость вещества. Из опытов следует, что взаимодействие электрически заряженных тел в воздухе практически не отличается от их взаимодействия в вакууме. Если заряженные тела находятся в воде, керосине, масле или какой-нибудь другой непроводящей среде, то модуль сил их взаимодействия оказывается меньше, чем в вакууме. Чтобы учесть влияние среды, ввели её специальную характеристику, называемую **диэлектрической проницаемостью**.

Диэлектрическая проницаемость вещества — физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль сил электростатического взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше модуля сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}, \quad (17.2)$$

где F_0 и F — модули сил электростатического взаимодействия зарядов в вакууме и в однородной среде соответственно.

С учётом соотношения (17.2) закон Кулона можно записать следующим образом:

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}.$$

Диэлектрическая проницаемость вакуума равна 1. За 1 принимают и диэлектрическую проницаемость воздуха, поскольку её значение (при нормальном атмосферном давлении) 1,0006. Диэлектрические проницаемости других однородных сред всегда больше единицы. Например, у воды диэлектрическая проницаемость 81, у глицерина — 56, а у керосина — 2.

От теории к практике

Как и во сколько раз отличаются модули сил электростатического взаимодействия двух точечных зарядов, находящихся на одинаковом расстоянии друг от друга в воде, керосине и глицерине?

Интересно знать

Диэлектрическая проницаемость дистиллированной воды при температуре 25 °C равна 78,54, а при температуре 0 °C — 88. Обычно без указания температуры диэлектрическую проницаемость воды полагают равной 81.



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)

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

В вакууме

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}$$

В однородной среде

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2}$$

Коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{Fr^2}{|q_1| \cdot |q_2|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

Электрическая постоянная

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз модуль сил взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше, чем модуль сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме:

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}$$



1. К какому виду взаимодействий относят взаимодействие неподвижных электрических зарядов (заряженных тел)?
2. Заряды каких заряженных тел можно считать точечными?
3. Опишите эксперименты Кулона по исследованию взаимодействия электрических зарядов.
4. Сформулируйте закон Кулона. Каковы условия применимости закона Кулона?
5. Чему равен в СИ коэффициент k ?
6. Математическая запись закона Кулона напоминает закон всемирного тяготения. В чём различие этих законов? Сравните физические понятия «масса» и «электрический заряд».
7. Что называют диэлектрической проницаемостью среды?



Примеры решения задач

Пример 1. Два точечных заряда находятся в керосине на расстоянии $r_1 = 42$ см. Определите, на каком расстоянии должны находиться эти заряды в глицерине, чтобы модуль сил их электростатического взаимодействия остался прежним. Диэлектрические проницаемости керосина $\epsilon_1 = 2,0$, глицерина $\epsilon_2 = 56,2$.

Дано:

$$r_1 = 42 \text{ см}$$

$$F_{k1} = F_{k2}$$

$$\epsilon_1 = 2,0$$

$$\epsilon_2 = 56,2$$

$$r_2 = ?$$

Решение. Поскольку $F_{k1} = F_{k2}$, то, воспользовавшись законом Кулона, можно записать: $k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon_1 r_1^2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon_2 r_2^2}$.

$$\text{Следовательно, } r_2 = r_1 \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}}.$$

$$r_2 = 42 \text{ см} \sqrt{\frac{2,0}{56,2}} = 7,9 \text{ см.}$$

Ответ: $r_2 = 7,9$ см.

Пример 2. Точечные заряды $q_1 = 3,4$ нКл и $q_2 = -5,6$ нКл находятся в вакуме на расстоянии $r = 36$ см. Определите модуль и направление результирующей силы, действующей на заряд $q_3 = 3,2$ нКл, помещённый в точку пространства, находящуюся на середине отрезка, соединяющего эти заряды.

Дано:

$$q_1 = 3,4 \text{ нКл} = 3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$q_2 = -5,6 \text{ нКл} = -5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$r = 36 \text{ см} = 0,36 \text{ м}$$

$$q_3 = 3,2 \text{ нКл} = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$\vec{F}_p = ?$$

Решение. Изобразим на рисунке силы \vec{F}_{13} и \vec{F}_{23} , действующие на точечный заряд q_3 со стороны точечных зарядов q_1 и q_2 соответственно. Построив векторную сумму сил \vec{F}_{13} и \vec{F}_{23} , определим, что результирующая \vec{F}_p этих сил направлена к заряду q_2 (рис. 102).

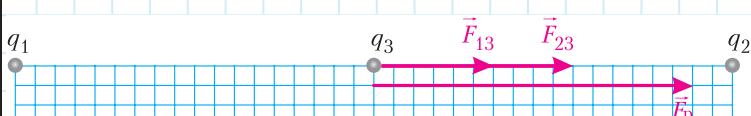


Рис. 102

Поскольку силы \vec{F}_{13} и \vec{F}_{23} направлены одинаково, то модуль результирующей силы $F_p = F_{13} + F_{23} = \frac{4kq_3}{r^2} (q_1 + |q_2|)$.

Таким образом,

$$F_p = \frac{4 \cdot 9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(0,36 \text{ м})^2} \cdot (3,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} + 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}) = \\ = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ Н} = 8,0 \text{ мкН.}$$

Ответ: $F_p = 8,0 \text{ мкН}$; сила направлена к заряду q_2 .



Упражнение 13

1. Определите модуль сил взаимодействия двух одинаковых неподвижных точечных зарядов $q_1 = q_2 = 9,0 \text{ нКл}$, находящихся на расстоянии $r = 0,30 \text{ м}$ в вакууме. Во сколько раз уменьшится или увеличится модуль сил взаимодействия этих зарядов при помещении их в керосин, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 2,0$?

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 $\alpha = 4$ 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. Точечные заряды q_1 и q_2 закреплены в вакууме (рис. 103). Определите модуль и направление результирующей силы, действующей на заряд q_3 , помещённый в точку, находящуюся на середине отрезка, соединяющего эти заряды.

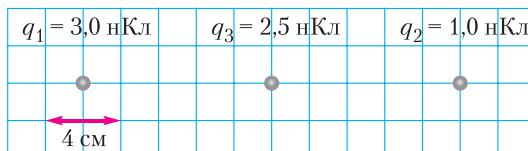


Рис. 103

5. Заряды двух одинаковых маленьких шариков массой $m = 40 \text{ г}$ каждый одинаковые. Расстояние между шариками существенно превышает их размеры. Определите модуль зарядов шариков, если кулоновская сила их отталкивания уравновешивает силу гравитационного притяжения этих шариков.

6. Небольшой шарик, заряд которого $q_1 = 20 \text{ нКл}$ и масса $m = 60 \text{ мг}$, подведен в воздухе на шёлковой нити. После того как на вертикали, проходящей через центр шарика, на расстоянии $r = 15 \text{ см}$ ниже его поместили другой маленький шарик, заряженный отрицательно, модуль силы упругости нити увеличился в два раза. Определите заряд второго шарика.



§ 18. Электростатическое поле

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?

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 по 1852 г., Фарадей ввёл в физику новое понятие — *поле*. Он рассматривал поле как материальную среду, которая является посредником при любых взаимодействиях удалённых друг от друга тел.

По современным представлениям, электрический заряд наделяет окружающее пространство особыми физическими свойствами — создаёт *электрическое поле*. Этот заряд называют источником поля и часто обозначают символом Q . Основным свойством электрического поля является его действие некоторой силой на внесённый в него заряд. Иначе говоря, заряды не действуют друг на друга непосредственно. Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством создаваемых ими полей.

Так, например, при взаимодействии неподвижных электрических зарядов электростатическое поле заряда q_1 действует некоторой силой на заряд q_2 , а поле заряда q_2 действует на заряд q_1 . Эти взаимодействия передаются не мгновенно, а с конечной скоростью, равной скорости света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. По мере удаления от заряда-источника поле ослабевает.

Электростатическое поле — поле, созданное неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами.

Электростатическое поле существует в пространстве, окружающем неподвижные заряды, неразрывно с ними связано и не изменяется со временем. Силу, которой поле действует на вносимый в него электрический заряд, называют *электрической силой* или *кулоновской силой*.

Чтобы исследовать электростатическое поле, созданное зарядом Q , в него помещают 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 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 заряд q_0 в любой точке поля.



Из истории физики

По мнению А. Эйнштейна, идея поля была самым важным открытием со времён Ньютона. Он писал, что «надо иметь могучий дар научного предвидения, чтобы распознать, что в описании электрических явлений не заряды и не частицы описывают суть явлений, а скорее пространство между зарядами и частицами». Фарадей создал концепцию электромагнитного поля, основанную на конечной скорости распространения любых взаимодействий. Математическую завершённость идеи Фарадея придал его гениальный соотечественник и преемник Джеймс Клерк Максвелл (1831–1879).



Электростатическое поле — поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами

Взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством создаваемых ими полей

Основным свойством электрического поля является его действие некоторой силой на внесённый в него заряд

Пробный заряд q_0

$|q_0| \ll |Q|$, где Q — заряд-источник поля

точечный

может быть как положительным, так и отрицательным



1. Какие факты подтверждают существование электрического поля?
2. Какое поле называют электростатическим?
3. Каковы основные особенности электростатического поля?

§ 19. Напряжённость электростатического поля. Принцип суперпозиции

Для изучения свойств электростатического поля удобно использовать такую его характеристику, которая не зависит от числового значения пробного заряда и позволяет определить силу, действующую на заряд со стороны поля в любой его точке. Для гравитационного поля такой характеристикой, не зависящей от массы тела, является ускорение свободного падения $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$. Какая физическая величина является характеристикой электростатического поля?

Напряжённость электростатического поля. Пусть электростатическое поле создано в вакууме точечным зарядом $Q > 0$. Если в некоторую точку поля поместить пробный положительный заряд q_0 , на него будет действовать кулоновская сила отталкивания, модуль которой $F = k \frac{Q q_0}{r^2}$.

Сила \vec{F} не может служить характеристикой поля, так как её модуль пропорционален значению пробного заряда q_0 . Однако отношение модуля силы, которой электростатическое поле точечного заряда Q действует на пробный заряд q_0 , не зависит от значения пробного заряда:

$$\frac{F}{q_0} = k \frac{Q}{r^2} \quad (19.1)$$

и, следовательно, может служить характеристикой поля.

Эту характеристику называют *напряжённостью электростатического поля* и обозначают \vec{E} . Напряжённость характеризует силовое действие поля на вносимые в него заряды.

Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (19.2)$$

С учётом выражений (19.1) и (19.2) можно определить модуль напряжённости электростатического поля, созданного точечным зарядом Q , в точке, находящейся на расстоянии r от него:

$$E = k \frac{|Q|}{r^2}.$$

Таким образом, модуль напряжённости поля, создаваемого в вакууме точечным зарядом, прямо пропорционален модулю этого заряда и обратно пропорционален квадрату расстояния между зарядом и точкой, в которой определяют значение напряжённости.

Если заряд Q находится в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то модуль напряжённости поля $E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$.

Из выражения $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$ 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 $\left(\frac{\text{В}}{\text{м}} \right)$.

Зная напряжённость электростатического поля, можно определить силу, действующую на любой точечный заряд в любой точке этого поля:

$$\vec{F} = \vec{E}q. \quad (19.3)$$

Напряжённость поля, как и сила, величина векторная. Направление напряжённости поля совпадает с направлением силы, действующей на положительный свободный электрический заряд. Напряжённость в любой точке электростатического поля точечного заряда 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. 104).

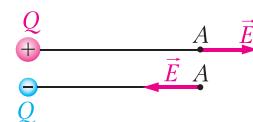


Рис. 104

От теории к практике

1. Как изменится модуль напряжённости в некоторой точке поля, созданного точечным зарядом Q , если: а) расстояние r от заряда до этой точки увеличить вдвое; б) заряд Q увеличить вдвое, а расстояние r от заряда до этой точки уменьшить вдвое?

2. Как направлена в точке A напряжённость поля, созданного неподвижным точечным зарядом (рис. 105)? Чему равен модуль напряжённости поля в этой точке?

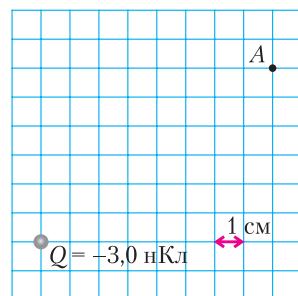


Рис. 105



Интересно знать

Кроме гравитационного поля у Земли есть электрическое и магнитное поля. Модуль напряжённости электрического поля у поверхности Земли в среднем составляет $130 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$. Электрическое поле Земли меняется во времени. Избыточный отрицательный электрический заряд земного шара колеблется около $-6 \cdot 10^5 \text{ Кл}$.

Принцип суперпозиции электрических полей. Пусть пробный заряд q_0 находится в некоторой точке электростатического поля, созданного не одним, а несколькими точечными зарядами. Экспериментально установили, что результирующая сила, действующая на пробный заряд, равна векторной сумме сил, действующих со стороны электростатических полей этих точечных зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots + \vec{F}_n. \quad (19.4)$$

Воспользовавшись формулой (19.3), можно определить силы, действующие на пробный заряд:

$$\vec{F} = \vec{E}q_0, \vec{F}_1 = \vec{E}_1q_0, \vec{F}_2 = \vec{E}_2q_0, \vec{F}_3 = \vec{E}_3q_0, \dots, \vec{F}_n = \vec{E}_nq_0,$$

где \vec{E} — результирующая напряжённость поля системы точечных зарядов, а $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_n$ — напряжённости полей в данной точке, создаваемых 1-м, 2-м, 3-м, ..., n -м точечными зарядами.

Подставив эти выражения в соотношение (19.4), получим, что если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n.$$

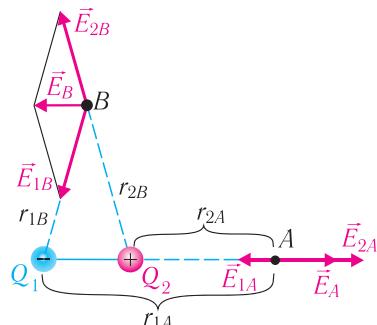


Рис. 106

Это положение называют *принципом суперпозиции полей*.

Воспользуемся принципом суперпозиции, чтобы определить в точках A и B напряжённости результирующего поля, созданного двумя точечными электрическими зарядами противоположных знаков $Q_1 < 0$ и $Q_2 > 0$, но с одинаковыми модулями (рис. 106).

Напряжённости \vec{E}_{1A} и \vec{E}_{2A} полей, созданных зарядами Q_1 и Q_2 , в точке A направлены вдоль

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. 106).



От теории к практике

1. Чему равен модуль напряжённости поля, создаваемого точечным неподвижным зарядом Q_1 , в точке A (рис. 107)?

2. Где следует разместить ещё один такой же точечный заряд $Q_2 = Q_1$, чтобы в точке A модуль напряжённости результирующего поля оказался равным нулю?



Рис. 107

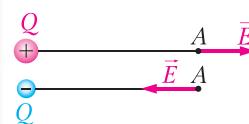


Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда: $E = \frac{\vec{F}}{q_0}$

Модуль напряжённости поля, созданного точечным зарядом:

$$\text{— в вакууме или в воздухе: } E = k \frac{|Q|}{r^2};$$

$$\text{— в однородной среде с диэлектрической проницаемостью } \epsilon: E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}$$



Принцип суперпозиции: если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то напряжённость результирующего поля в этой точке равна векторной сумме напряжённостей полей, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$





1. Что называют напряжённостью электростатического поля?
2. Как рассчитать напряжённость электростатического поля точечного заряда в некоторой точке этого поля?
3. Как определить силу, действующую со стороны электростатического поля, на внесённый в него точечный заряд?
4. Можно ли назвать ускорение свободного падения $\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$ напряжённостью гравитационного поля?
5. Пробный заряд помещают в разные точки электростатического поля, созданного зарядом Q (рис. 108). В каких точках модуль напряжённости поля максимальен? минимальен? В каких точках он одинаков?
6. Как направлена напряжённость поля, созданного точечным зарядом $Q < 0$; точечным зарядом $Q > 0$?
7. В чём заключается принцип суперпозиции электростатических полей?

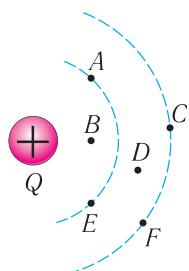


Рис. 108

Пример решения задачи

Два неподвижных точечных заряда $Q_1 = 6,70 \text{ нКл}$ и $Q_2 = -13,3 \text{ нКл}$ находятся в воздухе на расстоянии $r = 5,00 \text{ см}$ друг от друга. Определите модуль напряжённости электростатического поля в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 3,00 \text{ см}$ от положительного заряда и $r_2 = 4,00 \text{ см}$ от отрицательного.

Дано:

$$\begin{aligned} Q_1 &= 6,70 \text{ нКл} = 6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ Q_2 &= -13,3 \text{ нКл} = \\ &= -1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл} \\ r &= 5,00 \text{ см} = 5,00 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ r_1 &= 3,00 \text{ см} = 3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м} \\ r_2 &= 4,00 \text{ см} = 4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м} \end{aligned}$$

$$|\vec{E}| = ?$$

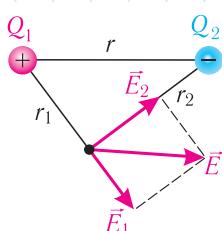


Рис. 109

Решение. Согласно принципу суперпозиции, напряжённость результирующего поля $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ (рис. 109) 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 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

$$E_1 = k \frac{Q_1}{r_1^2}, \quad E_2 = k \frac{|Q_2|}{r_2^2}.$$

$$\text{С учётом этого } E = k \sqrt{\left(\frac{Q_1}{r_1^2}\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{r_2^2}\right)^2}.$$

$$E = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \sqrt{\left(\frac{6,70 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{(3,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} \right)^2 + \left(\frac{1,33 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}}{(4,00 \cdot 10^{-2} \text{ м})^2} \right)^2} = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$$

Ответ: $E = 100 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.



Упражнение 14

1. В некоторую точку электростатического поля, в которой модуль напряжённости $E = 160 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, помещают точечный заряд $q = 4,00 \text{ нКл}$. Определите модуль силы, действующей на этот заряд со стороны электростатического поля.

2. Определите модуль точечного заряда, находящегося в воздухе, если на расстоянии $r = 1,0 \text{ см}$ от заряда модуль напряжённости поля $E = 3,6 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$.

3. Два положительных точечных заряда находятся на расстоянии $r_0 = 10 \text{ см}$ друг от друга. В точке, расположенной на прямой, соединяющей заряды, на расстоянии $r_1 = 8,0 \text{ см}$ от первого заряда модуль напряжённости результирующего электростатического поля равен нулю. Определите отношение зарядов $\frac{Q_1}{Q_2}$.

4. Электростатическое поле в точке создано неподвижными точечными зарядами $Q_1 = -4Q$ и $Q_2 = Q$ (рис. 110).

а) Изобразите в выбранном вами масштабе напряжённости \vec{E}_{1A} и \vec{E}_{2A} полей, созданных каждым зарядом в точке A .

б) Обозначьте на рисунке направление результирующей напряжённости \vec{E}_A .

в) Определите модуль результирующей напряжённости E_A поля, если $|Q| = 8,0 \text{ нКл}$.

5. Пылинка массой $m = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ г}$ имеет заряд $q = 5,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}$. Напряжённость поля в точке, где находится пылинка, направлена вертикально вверх. Определите модуль напряжённости электростатического поля, если пылинка находится в равновесии.

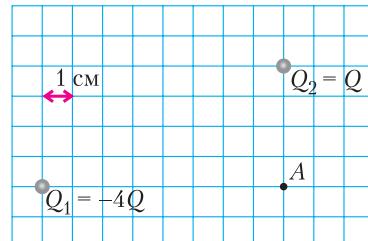


Рис. 110



§ 20. Линии напряжённости электростатического поля

Для описания электростатического поля нужно знать как модуль, так и направление напряжённости в каждой его точке. Чтобы наглядно отображать распределение поля в пространстве, Фарадей в 1845 г. предложил способ изображения электрических полей в виде воображаемых линий. Их назвали линиями напряжённости или силовыми линиями.

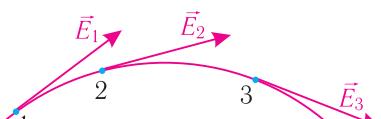
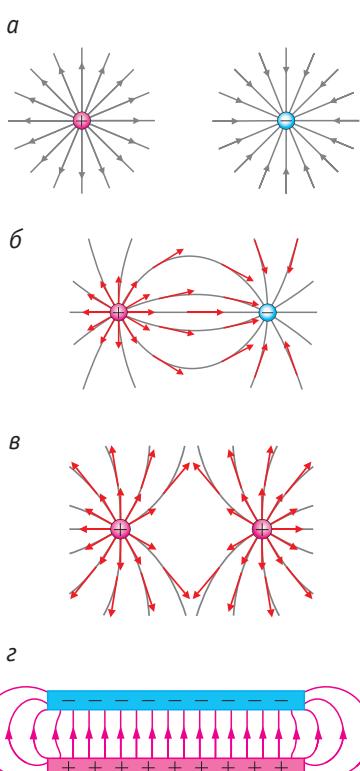


Рис. 111



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. 111).

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 112, а изображены линии напряжённости полей, образованных зарядами, равномерно распределёнными по поверхности уединённых проводящих шариков. Направление каждой стрелки на рисунке 112, а совпадает с направлением напряжённости поля. Линии напряжённости в первом случае 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.

Рис. 112

На рисунке 112, *б* изображены 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 112, *в* представлены линии напряжённости электростатического поля двух одинаково заряженных шариков.

На рисунке 112, *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*.

Однородное электростатическое поле — электростатическое поле, напряжённость которого во всех точках пространства одинакова.

Электростатические поля, изображённые на рисунках 112, *а*, *б*, *в*, являются неоднородными, так как или модуль, или направление (или и то, и другое) напряжённости в разных точках поля отличается.

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. 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. Число линий напряжённости, началом или концом которых служит данный заряд, пропорционально значению этого заряда (рис. 113).

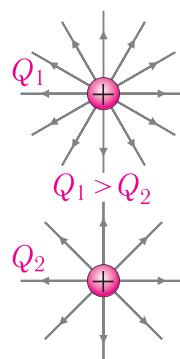
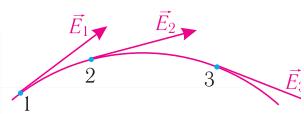


Рис. 113



Линии напряжённости — воображаемые направленные линии, касательные к которым в каждой точке поля совпадают по направлению с напряжённостью электростатического поля



начинаются на положительном заряде и оканчиваются на отрицательном заряде тел

не пересекаются, так как в каждой точке поля напряжённость имеет одно конкретное направление

не прерываются в пространстве, не содержащем электрических зарядов

по густоте линий можно судить о модуле напряжённости электростатического поля

Однородное электростатическое поле — электростатическое поле, напряжённость которого в любой его точке одинакова



- Что называют линиями напряжённости электростатического поля?
- Каковы особенности линий напряжённости электростатического поля?
- Как направлены линии напряжённости электростатического поля заряда в зависимости от его знака? системы двух зарядов (одноимённых и разноимённых)?
- Какое электростатическое поле называют однородным? Приведите примеры.

§ 21. Работа силы однородного электростатического поля. Потенциал

Электростатическое поле, действуя на находящиеся в нём заряды с определённой силой, может их перемещать. Вы знаете, что при перемещении тела действующая на него сила совершают работу. Выясним, от чего зависит работа силы по перемещению электрического заряда в электростатическом поле.

Работа силы однородного электростатического поля. Расчёты и результаты экспериментов доказали, что работа силы электростатического поля при перемещении заряда между двумя точками зависит только от положения этих точек

и не зависит от вида траектории. Такой же особенностью, как вы знаете, обладает и гравитационное поле. Физические поля, работа сил которых не зависит от формы траектории, называют *потенциальными*.

Выясним, как можно определить работу силы однородного электростатического поля напряжённостью \vec{E} по перемещению положительного пробного заряда q_0 . Поскольку электростатическое поле является потенциальным, то при перемещении заряда из точки B в точку D (рис. 114) работа силы поля независимо от формы траектории имеет одно и то же значение. Определим эту работу для случая, когда заряд перемещается вдоль отрезка прямой BD .

Вам известно, что работа силы $A = F\Delta r \cos \alpha$, где F — модуль силы, действующей на тело; Δr — модуль перемещения тела под действием этой силы; α — угол между направлениями силы и перемещения. В нашем случае модуль электрической силы $F = q_0 E$, поэтому работа силы поля $A_{BD} = q_0 E \Delta r \cos \alpha$. Поскольку $\Delta r \cos \alpha = d$ (см. рис. 114), где d — расстояние между заряженными пластинами, создающими поле, то

$$A_{BD} = q_0 E d. \quad (21.1)$$

Работа силы электростатического поля может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Например, если бы заряд перемещался не из точки B в точку D , а наоборот — из точки D в точку B , то работа силы была бы отрицательной: $A_{DB} = -q_0 E d$. При перемещении заряда перпендикулярно линиям напряжённости работа силы поля $A = 0$.

От теории к практике

Какую работу совершил сила однородного электростатического поля, модуль напряжённости которого $E = 20 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$, при перемещении заряда $q = 2,4 \text{ нКл}$ по отрезку прямой (рис. 115), соединяющему точки: а) B и C ; б) C и D ; в) D и B ?

Какую работу совершил сила поля при перемещении заряда по замкнутой траектории $BCDB$?

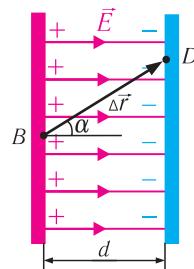


Рис. 114

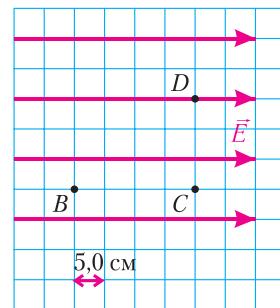


Рис. 115

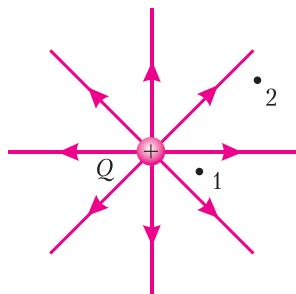


Рис. 116

Потенциальная энергия заряда в электростатическом поле. Электростатическое поле является потенциальным, и, следовательно, работа силы поля по перемещению электрического заряда q из точки 1 в точку 2 (рис. 116) может служить мерой изменения потенциальной энергии этого заряда в поле, созданном зарядом Q . Пусть W_{n1} и W_{n2} — потенциальные энергии перемещаемого заряда в точках 1 и 2 электростатического поля. Тогда работа силы поля

$$A_{12} = -\Delta W_{n12} = -(W_{n2} - W_{n1}), \quad (21.2)$$

где ΔW_{n12} — приращение потенциальной энергии заряда q при его перемещении из точки 1 в точку 2.

Перепишем выражение (21.2) в виде

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2} \quad (21.3)$$

и проанализируем его, когда на заряд q действует только сила со стороны электростатического поля:

1) если работа силы поля $A_{12} > 0$ (перемещение положительного заряда q происходит в направлении линий напряжённости поля), то потенциальная энергия заряда уменьшается: $\Delta W_{n12} < 0$. При этом, согласно закону сохранения энергии, увеличивается кинетическая энергия тела с зарядом q : $\frac{mv_2^2}{2} > \frac{mv_1^2}{2}$;

2) если работа силы поля $A_{12} < 0$ (перемещение положительного заряда противоположно направлению линий напряжённости поля), то потенциальная энергия заряда увеличивается: $\Delta W_{n12} > 0$. При этом кинетическая энергия заряженного тела уменьшается: $\frac{mv_2^2}{2} < \frac{mv_1^2}{2}$;

3) если работа силы поля $A_{12} = 0$ (перемещение заряда перпендикулярно направлению линий напряжённости поля), то потенциальная энергия заряда не изменяется.



От теории к практике

В каком случае (см. рис. 115) при перемещении положительного (отрицательного) заряда между двумя точками поля потенциальная энергия этого заряда: а) увеличивается; б) уменьшается; в) не изменяется?

Потенциал электростатического поля как его энергетическая характеристика. Из выражений (21.1) и (21.2) следует, что потенциальная энергия пробного заряда q_0 в данной точке поля пропорциональна величине этого заряда.

Следовательно, отношение $\frac{W_n}{q_0}$ не зависит от заряда и является энергетической характеристикой электростатического поля, получившей название *потенциал*.

Потенциал электростатического поля в данной точке пространства — физическая скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии пробного заряда, помещённого в данную точку поля, к значению этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0}. \quad (21.4)$$

За единицу потенциала в СИ принят вольт (В). Единица названа в честь итальянского учёного Alessandro Volta (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

$$\varphi = k \frac{Q}{r}. \quad (21.5)$$

Знак заряда-источника поля определяет знак потенциала этого поля.

Если электрическое поле создано в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ , то потенциал поля

$$\varphi = k \frac{Q}{\epsilon r}.$$



Потенциал является скалярной величиной. Поэтому, если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то потенциал результирующего поля в этой точке равен алгебраической сумме потенциалов полей в этой же точке пространства, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n,$$

т. е. для потенциала выполняется *принцип суперпозиции*.

От теории к практике

Электростатическое поле создано точечным неподвижным зарядом Q . Потенциал поля в точке, расположенной от заряда Q на расстоянии $r = 27$ см, $\varphi = 80$ В. В эту точку помещают пробный заряд q_0 . Определите: а) значение заряда, создающего поле; б) значение пробного заряда, если его потенциальная энергия в данной точке поля $W_n = -0,8$ мкДж.





Работа силы электростатического поля по перемещению заряда:

- из одной точки поля в другую не зависит от формы траектории;
- может быть положительной, отрицательной или равной нулю;
- при перемещении заряда по замкнутой траектории равна нулю

Работа силы однородного электростатического поля по перемещению заряда:

$$A = qEd$$

Работа силы электростатического поля по перемещению заряда из начальной точки 1 в конечную точку 2 равна приращению потенциальной энергии заряда в этом поле, взятому со знаком минус, или же убыли потенциальной энергии:

$$A_{12} = -\Delta W_{n12} = -(W_{n2} - W_{n1}) = W_{n1} - W_{n2}$$

Потенциал электростатического поля в данной точке пространства — физическая скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии пробного заряда, помещённого в данную точку поля, к значению этого заряда:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0}$$

Потенциал электростатического поля точечного заряда:

- в вакууме
- $\varphi = k \frac{Q}{r};$
- в однородной среде с диэлектрической проницаемостью ϵ

$$\varphi = k \frac{Q}{\epsilon r}$$

Если в данной точке пространства электростатическое поле создано системой точечных зарядов, то потенциал результирующего поля в этой точке равен алгебраической сумме потенциалов полей в этой же точке пространства, создаваемых каждым из точечных зарядов системы в отдельности:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_n$$





1. Как определить работу силы однородного электростатического поля по перемещению электрического заряда?
2. Как вы понимаете утверждение «электростатическое поле потенциально»? Как связана работа силы электростатического поля по перемещению электрического заряда с изменением потенциальной энергии заряда в этом поле?
3. Какие две физические величины характеризуют электростатическое поле в любой его точке?
4. Что называют потенциалом электростатического поля?
5. Чему равен потенциал электростатического поля точечного заряда Q на расстоянии r от него?
6. Как определить потенциал электростатического поля, созданного несколькими точечными зарядами?



Пример решения задачи

Электростатическое поле создано неподвижным точечным зарядом Q . В точке, находящейся на расстоянии $r = 80$ см от заряда, потенциал поля $\varphi = 0,42$ кВ. Определите модуль силы, действующей со стороны поля на точечный заряд $q = 1,5$ нКл, помещённый в эту точку.

Дано:

$$r = 80 \text{ см} = 0,80 \text{ м}$$

$$\varphi = 0,42 \text{ кВ} = 4,2 \cdot 10^2 \text{ В}$$

$$q = 1,5 \text{ нКл} = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$$

$$F = ?$$

Решение. Модуль силы, которой электростатическое поле заряда Q действует на заряд q_2 , можно определить, воспользовавшись законом Кулона:

$$F = k \frac{Qq}{r^2}. \quad (1)$$

Из формулы (21.5) для потенциала поля точечного заряда найдём значение заряда:

$$Q = \frac{\varphi r}{k}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим:

$$F = k \frac{q\varphi r}{kr^2} = \frac{q\varphi}{r}.$$

$$F = \frac{1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 4,2 \cdot 10^2 \text{ В}}{0,80 \text{ м}} = 7,9 \cdot 10^{-7} \text{ Н.}$$

Ответ: $F = 7,9 \cdot 10^{-7}$ Н.



Упражнение 15

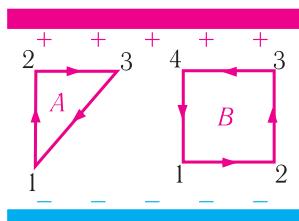


Рис. 117

1. Зависит ли работа силы электростатического поля от траектории движения заряда? Сравните работу силы электростатического поля, образованного заряженными пластинами, при перемещении заряда q по контуру A и контуру B (рис. 117).

2. Отрицательный заряд, модуль которого $|q| = 0,50$ мКл, переместили в однородном электростатическом поле на расстояние $d = 10$ см в направлении линий напряжённости. Определите работу силы поля, совершённую при перемещении заряда, и изменение потенциальной энергии взаимодействия заряда с полем, если модуль его напряжённости $E = 2,0 \frac{\text{кВ}}{\text{см}}$.

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, совершаяя силой электростатического поля при переносе заряда $q = 2,4$ нКл из бесконечности в некоторую точку поля, $A = 72$ нДж. Определите потенциал этой точки поля. Что изменится, если работу по переносу первоначально неподвижного заряда совершает внешняя сила против силы электростатического поля? Минимальное значение работы внешней силы $A_{\text{внеш}} = 72$ нДж.

5. Модули напряжённости двух точек поля, создаваемого неподвижным точечным зарядом, отличаются в $\alpha = 9$ раз. Определите, во сколько раз отличаются потенциалы этих точек поля.

6. Электростатическое поле создано находящимся на расстоянии $r = 80$ см друг от друга двумя разноимёнными точечными зарядами, модули которых $|Q_1| = |Q_2| = 6,4$ нКл. Определите модуль напряжённости и потенциал в точке пространства, находящейся на середине отрезка, соединяющего эти заряды.



§ 22. Разность потенциалов электростатического поля.

Напряжение. Связь между напряжением и напряжённостью однородного электростатического поля

Потенциальная энергия любой системы тел, взаимодействующих посредством потенциальных сил, зависит от выбора нулевой точки (нулевого уровня). Однако изменение потенциальной энергии 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. Перемещение заряженных частиц в электростатическом поле, сопровождаемое изменением их потенциальной энергии, характеризуют, используя понятие «разность потенциалов». Как и приращение потенциальной энергии, разность потенциалов не зависит от выбора нулевой точки. Пусть пробный заряд q_0 перемещается в электростатическом поле под действием силы поля из точки 1 в точку 2, потенциалы которых ϕ_1 и ϕ_2 (рис. 118).

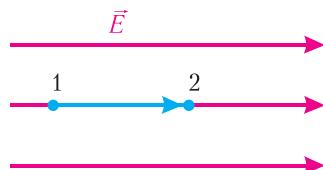


Рис. 118

Разность потенциалов U_{12} между двумя точками электростатического поля — физическая скалярная величина, равная отношению работы, совершающей силой поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную, к значению этого заряда:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}.$$

С учётом выражений (21.3) и (21.4) получим:

$$U_{12} = \frac{W_{n1} - W_{n2}}{q_0} = \frac{\Phi_1 q_0 - \Phi_2 q_0}{q_0} = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (22.1)$$

Из выражения (22.1) следует, что разность потенциалов численно равна убыли потенциальной энергии перемещаемого в поле единичного пробного заряда.

Противоположную по знаку разности потенциалов величину называют приращением потенциала $\Delta\Phi_{12} = \Phi_2 - \Phi_1 = -(\Phi_1 - \Phi_2) = -U_{12}$.

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.

Отметим, что когда говорят о «потенциале поля в некоторой точке», под этим всегда понимают разность потенциалов между этой точкой и точкой, потенциал поля в которой принял равным нулю.

Потенциал проводника можно измерить электрометром. Для этого проводник соединяют со стрелкой электрометра, корпус которого заземляют. Отклонение 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. Отметим, что для электростатических полей понятия «электрическое напряжение» и «разность потенциалов» тождественны.

Работа, совершаемая силой однородного электростатического поля напряжённостью \bar{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 (22.1)

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

а в соответствии с выражением (21.1)

$$A_{12} = q_0Ed,$$

где d — модуль перемещения заряда вдоль линии напряжённости однородного электростатического поля.

Приравнивая соответствующие части равенств, найдём выражение, устанавливающее связь между модулем напряжённости однородного электростатического поля и разностью потенциалов, т. е. между двумя характеристиками электростатического поля: $q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0Ed$, откуда

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = -\frac{\Delta\varphi_{12}}{d}. \quad (22.2)$$

Из выражения (22.2) следует: чем больше разность потенциалов между двумя точками однородного электростатического поля, тем больше модуль напряжённости поля. Если разность потенциалов равна нулю (потенциал поля не меняется), то модуль напряжённости поля также равен нулю.

Принимая во внимание, что $U_{12} = -\Delta\varphi_{12}$, получим:

$$E = \frac{U_{12}}{d}. \quad (22.3)$$

На основании формулы (22.3) 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 $U_{12} > 0$.



Разностью потенциалов между двумя точками электростатического поля называют физическую скалярную величину, равную отношению работы, совершающей силой поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную точку, к значению перемещаемого заряда:

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

Разность потенциалов численно равна убыли потенциальной энергии перемещаемого в поле единичного пробного заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\Delta W_{\text{п12}}}{q_0}$$

Работа, совершаемая силой поля при перемещении заряда:
 $A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12}$

Модуль напряжённости однородного электростатического поля и разность потенциалов (напряжение) связаны между собой соотношением:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{U_{12}}{d},$$

если точки 1 и 2 поля выбраны так, что $U_{12} > 0$



1. Что называют разностью потенциалов?
2. Как разность потенциалов между двумя точками поля зависит от работы силы электростатического поля?
3. В каких единицах измеряют разность потенциалов?
4. Как связано напряжение с напряжённостью однородного электростатического поля?

5. Заполните таблицу в тетради и сделайте вывод.

№ п/п	Вопрос	Сравниваемые объекты	
		Напряжённость	Потенциал
1	Является векторной или скалярной физической величиной?		
2	Что характеризует данная физическая величина?		
3	Как определяют данную физическую величину?		
4	Как определяют данную физическую величину для электростатического поля точечного заряда?		
5	Чему равна работа по перемещению заряда в однородном поле?		
6	Выполняется ли принцип суперпозиции для данной величины?		
7	Как связаны напряжённость и потенциал (разность потенциалов)?		

Примеры решения задач

Пример 1. Электростатическое поле создано точечным зарядом $Q = 2,4 \text{ нКл}$. Определите работу силы поля по переносу пробного заряда $q_0 = 3,0 \text{ пКл}$ из точки A в точку B , если точки находятся на расстояниях $r_A = 1,0 \text{ м}$ и $r_B = 4,0 \text{ м}$ от заряда-источника поля, а среда — однородное вещество с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,0$.

Дано:

$$\begin{aligned} Q &= 2,4 \text{ нКл} = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ q_0 &= 3,0 \text{ пКл} = 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \\ r_A &= 1,0 \text{ м} \\ r_B &= 4,0 \text{ м} \\ \epsilon &= 2,0 \end{aligned}$$

$$A_{AB} = ?$$

Решение. Поле электростатическое, поэтому работа силы поля при переносе пробного заряда q_0 из точки A в точку B не зависит от формы траектории и её можно определить по формуле $A_{AB} = q_0(\phi_A - \phi_B)$. Потенциалы точек A и B в данной среде $\phi_A = \frac{kQ}{\epsilon r_A}$ и $\phi_B = \frac{kQ}{\epsilon r_B}$ соответственно.

Тогда

$$A_{AB} = q_0 \left(\frac{kQ}{\epsilon r_A} - \frac{kQ}{\epsilon r_B} \right) = \frac{kQq_0}{\epsilon} \cdot \frac{r_B - r_A}{r_A r_B}.$$

Подставив числовые значения, получим

$$A_{AB} = \frac{9,0 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \cdot 3,0 \cdot 10^{-12} \text{ Кл} \cdot (4,0 \text{ м} - 1,0 \text{ м})}{2,0 \cdot 1,0 \text{ м} \cdot 4,0 \text{ м}} = 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ Дж.}$$

Ответ: $A_{AB} = 2,4 \cdot 10^{-11}$ Дж.

Пример 2. Электрон начинает двигаться в электрическом поле от точки 1 до точки 2. Определите модуль скорости движения электрона в точке 2, если он ускоряется разностью потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2 = -40$ В. Модуль заряда электрона $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а его масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Дано:

$$v_1 = 0$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = -40 \text{ В}$$

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

$$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_2 = ?$$

Решение. Сила электрического поля совершает работу по изменению кинетической энергии электрона: $A_{12} = \Delta W_k$. Работу силы поля также можно определить по формуле $A_{12} = e(\varphi_1 - \varphi_2)$. Тогда

$$\Delta W_k = e(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

Изменение кинетической энергии электрона

$$\Delta W_k = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_1^2}{2}, \text{ где } \frac{m_e v_1^2}{2} = 0.$$

Тогда с учётом формулы (1) модуль скорости движения электрона в точке 2:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta W_k}{m_e}} = \sqrt{\frac{2e(\varphi_1 - \varphi_2)}{m_e}}.$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot (-40 \text{ В}) \cdot 2}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} = 3,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: $v_2 = 3,8 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.



Упражнение 16

1. Сила электростатического поля совершает работу $A = 1,0 \text{ мкДж}$, перемещая заряженную частицу из точки с потенциалом $\varphi_1 = 100 \text{ В}$ в точку с потенциалом $\varphi_2 = 75 \text{ В}$. Определите значение электрического заряда частицы.

2. Чтобы в воздухе при атмосферном давлении прокочила искра, в нём должно быть электростатическое поле, модуль напряжённости которого не менее $E = 3,00$. Определите разность потенциалов между облаком и поверхностью Земли во время грозы, если длина «искры» — молнии — $d = 480$ м.

3. 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.

4. 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.

5. Пылинка массой $m = 4,0 \cdot 10^{-9}$ кг находится во взвешенном состоянии между разноимённо заряженными горизонтальными пластинами, напряжение между которыми $U = 12$ В, а расстояние $d = 4,0$ см. Определите электрический заряд пылинки.

6. Электрон из состояния покоя ускоряется в электростатическом поле, двигаясь из точки 1 в точку 2. Определите напряжение между этими точками, если модуль скорости движения электрона в точке 2 составляет $v_2 = 2,7 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.
 § 22-1 Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.
 § 22-2
 § 22-3

§ 23. Конденсаторы. Электроёмкость конденсатора. Электроёмкость плоского конденсатора

Во многих электротехнических и радиотехнических приборах используют устройства, способные при малых размерах накапливать значительные разноимённые электрические заряды и связанную с ними электрическую энергию. Какие это устройства и от чего зависят накопленные ими заряды и запасённая энергия?

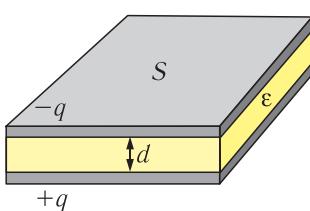


Рис. 119

Конденсаторы. Для накапливания значительных разноимённых зарядов используют устройство, называемое конденсатором (от лат. *condensator*, буквально — тот, кто уплотняет, сгущает). Простейший конденсатор — система, состоящая из двух проводников, разделённых слоем диэлектрика, толщина d которого мала по сравнению с размерами проводников (рис. 119). Проводники, образующие конденсатор, называют его *обкладками*.

На обкладках конденсатора накапливаются противоположные по знаку электрические заряды, модули которых равны. Процесс накапливания зарядов на обкладках называют *зарядкой конденсатора*, а процесс нейтрализации зарядов при соединении обкладок конденсатора проводником — *разрядкой конденсатора*. Модуль заряда, находящегося на одной из обкладок конденсатора, называют *зарядом конденсатора*.



Из истории физики

В 1745—1746 гг. немецкий физик Эвальд фон Клейст (1700—1748) и нидерландский физик Питер ван Мушенбрук (1692—1761) независимо друг от друга изобрели первый конденсатор — лейденскую банку. Изобретение конденсатора способствовало изучению электрических явлений, так как позволило накапливать большие электрические заряды.

Интересно знать

Широко распространённый тип конденсаторов представляют собой две ленты металлической фольги, разделённые тонкой парафинированной бумагой, полистиролом, слюдой или другим диэлектриком, которые свёрнуты в тугой рулон и запаяны (рис. 120). Используют и так называемые воздушные конденсаторы, в которых изолирующим слоем, отделяющим проводники, является воздух.

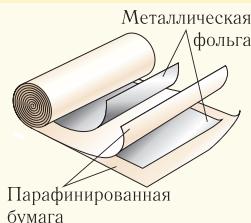


Рис. 120

Электроёмкость конденсатора. В процессе зарядки простейшего конденсатора его обкладки приобретают противоположные по знаку заряды q и $-q$, модули которых равны. Эти заряды создают между обкладками электростатическое поле, линии напряжённости которого начинаются на положительно заряженной обкладке и заканчиваются на отрицательно заряженной. Многочисленные эксперименты свидетельствуют, что при неизменных размерах и форме проводников (обкладок конденсатора), а также диэлектрических свойствах среды, в которой они находятся, сохраняется прямая пропорциональная зависимость между зарядом конденсатора и напряжением между его обкладками.

Следовательно, величина, равная отношению $\frac{q}{U}$ заряда конденсатора к напряжению между его обкладками, является постоянной для данного конденсатора и не зависит ни от заряда, ни от напряжения. Эту величину назвали *электрической ёмкостью* C (электроёмкостью). Электроёмкость количественно характеризует способность конденсатора накапливать электрические заряды.

Электрическая ёмкость конденсатора — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}. \quad (23.1)$$

Проанализировав формулу (23.1), можно сделать вывод: чем меньше напряжение U на обкладках конденсатора при сообщении им зарядов q и $-q$, тем больше электроёмкость конденсатора.

Единицей электрической ёмкости в СИ является фарад (Φ).

$$1\Phi = \frac{1\text{ Кл}}{1\text{ В}}.$$

1 Φ — очень большая электроёмкость. Электроёмкостью $C = 1\Phi$ обладал бы находящийся в вакууме уединённый шар радиусом $R = 9 \cdot 10^9\text{ м}$ (для сравнения: радиус земного шара $R_3 = 6,4 \cdot 10^6\text{ м}$). Поэтому на практике применяют дальние единицы: микрофарад ($1\text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6}\Phi$), нанофарад ($1\text{ нФ} = 1 \cdot 10^{-9}\Phi$) и пикофарад ($1\text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12}\Phi$).

Например, электроёмкость такого огромного проводника, как земной шар, равна $C = 0,71\text{ мФ}$, а электроёмкость человеческого тела примерно $C = 50\text{ пФ}$.

От теории к практике

- Изменится ли электроёмкость конденсатора, если: а) увеличить напряжение между его обкладками; б) уменьшить заряд конденсатора?
- Электроёмкость конденсатора $C = 10\text{ нФ}$. Каков заряд конденсатора, если напряжение между его обкладками $U = 150\text{ В}$?

Из истории физики

В XVII—XVIII вв. учёные рассматривали электричество как «нематериальную жидкость». Эта «жидкость» могла «вливаться» в проводник и «выливаться» из него. Так появился термин «электрическая ёмкость».

Интересно знать

На схемах номинальную электроёмкость конденсаторов обычно указывают в микрофардах и пикофардах. 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.

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. Вблизи краёв пластин однородность поля нарушается, однако этим часто пренебрегают, когда расстояние между пластинами значительно меньше их размеров (рис. 121).

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 параллельно друг другу. Соединим стержень электрометра с одной из пластин, а его корпус с другой (рис. 122). Зарядим конденсатор, подключив его к источнику тока на некоторый промежуток времени. Когда между пластинами конденсатора возникнет напряжение (стрелка электрометра отклонится), отключим его от источника тока.

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 ($d \uparrow \Rightarrow C \downarrow$).

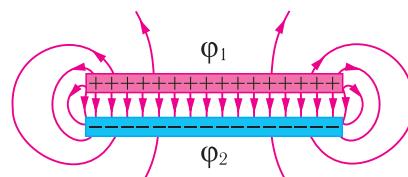


Рис. 121

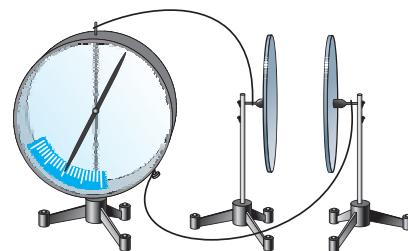


Рис. 122

Если между обкладками конденсатора поместить пластину из диэлектрика, например из стекла, то показания электрометра уменьшаются. 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:

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

где S — площадь одной из обкладок конденсатора (площадь взаимного перекрытия обкладок конденсатора); d — расстояние между обкладками; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, находящейся между его обкладками.

Рис. 123 Условное изображение конденсатора постоянной электроёмкости на электрических схемах представлено на рисунке 123.

От теории к практике

- Один из двух уединённых проводящих шаров сплошной, а второй — имеет внутри полость. Если диаметры шаров одинаковые, то какой из них имеет большую электроёмкость?
- Расстояние между обкладками плоского воздушного конденсатора уменьшили в два раза. Если при этом заряд конденсатора остался прежним, то изменились ли напряжение между его обкладками и напряжённость поля? Если изменились, то как?

Интересно знать

Зависимость электроёмкости конденсатора от расстояния между его обкладками 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. 124).



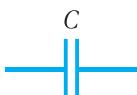
Рис. 124



Электрическая ёмкость конденсатора — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками:

$$C = \frac{q}{U}$$

Условное обозначение:



Электроёмкость плоского конденсатора:

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

Зависит от площади взаимного перекрытия обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости среды, находящейся между обкладками.

1. Что представляет собой конденсатор? Каково его назначение?
 2. Какой процесс называют зарядкой конденсатора? разрядкой конденсатора?
 3. Что понимают под зарядом конденсатора?
 4. Какую физическую величину называют электроёмкостью конденсатора? В каких единицах её измеряют?
 5. От чего зависит электроёмкость плоского конденсатора?
 6. Плоский воздушный конденсатор присоединён к источнику постоянного тока. Изменятся ли заряд конденсатора и напряжение на нём, если пространство между обкладками конденсатора заполнить диэлектриком?

Примеры решения задач

Пример 1. Плоскому конденсатору электроёмкостью $C = 0,4 \text{ мкФ}$ сообщён электрический заряд $q = 2 \text{ нКл}$. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками конденсатора, если расстояние между ними $d = 5 \text{ мм}$.

Дано:

$$\begin{aligned} C &= 0,4 \text{ мкФ} = 4 \cdot 10^{-7} \Phi \\ q &= 2 \text{ нКл} = 2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} \\ d &= 5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \end{aligned}$$

$$E — ?$$

Решение. Модуль напряжённости однородного электростатического поля определим по формуле $E = \frac{U}{d}$. Так как напряжение между обкладками конденсатора: $U = \frac{q}{C}$, то $E = \frac{q}{Cd}$.

$$E = \frac{2 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}}{4 \cdot 10^{-7} \Phi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Ответ: $E = 1 \frac{\text{В}}{\text{м}}$.

Пример 2. Пространство между обкладками плоского конденсатора заполнено диэлектриком. Конденсатор зарядили до напряжения $U_1 = 1 \text{ кВ}$ и отключили от источника тока. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, если после его удаления из конденсатора напряжение увеличилось до $U_2 = 3 \text{ кВ}$.

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

$$C_1 U_1 = C_2 U_2. \quad (1)$$

Электроёмкость плоского конденсатора определяют по формуле

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

Для рассматриваемых случаев электроёмкости соответственно равны:

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 S}{d}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2 S}{d}. \quad (2)$$

Подставив формулы (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 17

1. Определите электроёмкость конденсатора, если напряжение между его обкладками $U = 20 \text{ В}$, а заряд $q = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$.

2. Электроёмкость плоского воздушного конденсатора $C = 54 \text{ пФ}$. Определите расстояние между его обкладками, если площадь их перекрытия $S = 300 \text{ см}^2$.

3. Определите, как изменится электроёмкость плоского конденсатора, если площадь перекрытия его обкладок увеличить в $\alpha = 2$ раза, а расстояние между ними уменьшить в $\beta = 3$ раза.

4. Обкладки плоского конденсатора площадью $S = 100 \text{ см}^2$ каждая расположены на расстоянии $d = 2,0 \text{ мм}$. Пространство между ними заполнено слюдой, диэлектрическая проницаемость которой $\epsilon = 6,0$. Определите заряд конденсатора, если напряжение между его обкладками $U = 3,0 \text{ кВ}$.

5. Определите модуль напряжённости электростатического поля между обкладками плоского воздушного конденсатора, заряд которого $q = 20 \text{ нКл}$, а площадь перекрытия обкладок $S = 50 \text{ см}^2$.

6. Модуль напряжённости электростатического поля в пространстве между обкладками плоского воздушного конденсатора $E_1 = 2,1 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$. Не отключая конденсатор от источника тока, расстояние между его обкладками уменьшили в $\alpha = 4,0$ раза. Определите модуль напряжённости поля после сближения обкладок.

7. Капля, масса которой $m = 1,5 \text{ г}$, находится в равновесии между горизонтально расположенными обкладками плоского воздушного конденсатора, заряженного до напряжения $U = 500 \text{ В}$. Определите расстояние между обкладками, если заряд капли $q = 0,15 \text{ мкКл}$.



§ 23-1

§ 24. Энергия электростатического поля конденсатора

Процесс зарядки конденсатора 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 внешней силой, равна энергии электростатического поля заряженного конденсатора.

Убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией, можно на опыте. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, конденсатора и электрической лампы. Схема цепи представлена на рисунке 125. 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 энергия, запасённая им при зарядке, превращается во внутреннюю энергию спиралей лампы, часть этой энергии расходуется на излучение света. При прохождении электрического тока по цепи с источником тока конденсатор заряжался, т. е. на его обкладках накапливались электрические заряды. При этом в окружающем конденсатор пространстве возникло электростатическое поле. Суммарный электрический заряд обеих обкладок

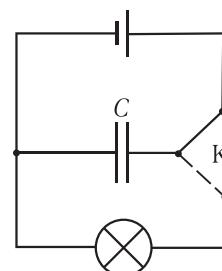


Рис. 125



конденсатора до его зарядки, во время зарядки и после разрядки конденсатора равен нулю. Единственное изменение, которое произошло при разрядке конденсатора, заключается в том, что исчезло электростатическое поле, которое создавалось зарядами обеих обкладок конденсатора. Следовательно, энергией обладало электростатическое поле, образованное зарядами обкладок заряженного конденсатора.

Расчёты подтверждают, что формулу для определения энергии электростатического поля заряженного конденсатора можно записать в виде:

$$W = \frac{qU}{2}, \text{ или } W = \frac{CU^2}{2}, \text{ или } W = \frac{q^2}{2C}.$$

От теории к практике

Как изменится энергия электростатического поля заряженного конденсатора при увеличении расстояния между его обкладками, если: а) конденсатор отключён от источника тока; б) конденсатор подключен к источнику тока?

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 электротерапии), фототехнике (для получения вспышки света при фотографировании).

В связи с этим наряду с миниатюрными конденсаторами (рис. 126, *а*), имеющими массу менее грамма и размеры порядка нескольких миллиметров, существуют конденсаторы с массой в несколько тонн (рис. 126, *б*).

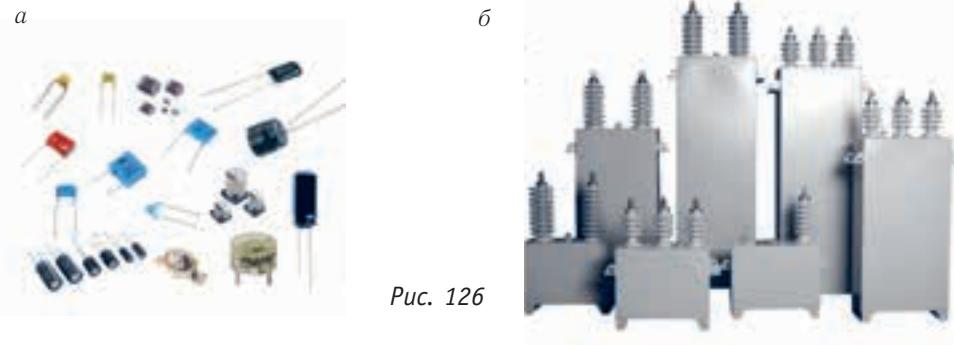


Рис. 126



Энергия электростатического поля конденсатора

$$W = \frac{qU}{2}$$

$$q = CU$$

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

$$U = \frac{q}{C}$$

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



1. Какие факты позволяют сделать вывод, что электростатическое поле обладает энергией?
2. Как можно убедиться в том, что заряженный конденсатор обладает энергией?
3. Как можно рассчитать энергию электростатического поля заряженного конденсатора?



Примеры решения задач

Пример 1. Определите, как и во сколько раз изменится энергия электростатического поля заряженного плоского воздушного конденсатора, если пространство между его обкладками заполнить керосином, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon_2 = 2$. Рассмотрите случаи: а) конденсатор отключён от источника тока; б) конденсатор подключен к источнику тока.

Дано:

$$\begin{aligned}\epsilon_1 &= 1 \\ \epsilon_2 &= 2\end{aligned}$$

$$\frac{W_2}{W_1} — ?$$

Решение. Электроёмкость воздушного конденсатора $C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d} = \frac{\epsilon_0 S}{d}$. Электроёмкость этого конденсатора после заполнения пространства между обкладками керосином $C_2 = \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 S}{d}$. Следовательно, $C_2 = \epsilon_2 C_1$.

В случае а) конденсатор отключён от источника тока, поэтому $q_2 = q_1$. Тогда, если энергия электростатического поля воздушного конденсатора $W_1 = \frac{q^2}{2C_1}$, то энергия электростатического поля этого конденсатора, заполненного керосином:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2\epsilon_2 C_1} = \frac{W_1}{\epsilon_2}.$$

Таким образом, энергия электростатического поля уменьшилась в 2 раза.

В случае б) конденсатор не отключён от источника тока, поэтому напряжение между его обкладками равно напряжению между полюсами источника тока $U_2 = U_1 = U$. Тогда, если энергия электростатического поля воздушного конденсатора $W_1 = \frac{C_1 U^2}{2}$, то энергия электростатического поля этого конденсатора, заполненного керосином:

$$W_2 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{\epsilon_2 C_1 U^2}{2} = \epsilon_2 W_1.$$

Таким образом, энергия электростатического поля увеличилась в 2 раза.

Ответ: а) энергия электростатического поля уменьшилась в 2 раза;
б) энергия электростатического поля увеличилась в 2 раза.

Пример 2. Плоский воздушный конденсатор, площадь перекрытия обкладок которого $S = 100 \text{ см}^2$, поместили в керосин с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,0$ и подключили к источнику тока с напряжением на полюсах $U = 120 \text{ В}$. Определите минимальную работу, которую необходимо совершить внешней силе, чтобы после отключения конденсатора от источника тока медленно увеличить расстояние между его обкладками от $d_1 = 1,0 \text{ см}$ до $d_2 = 2,0 \text{ см}$.

Дано:

$$S = 100 \text{ см}^2 = 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$$

$$\epsilon = 2,0$$

$$U = 120 \text{ В}$$

$$d_1 = 1,0 \text{ см} = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$d_2 = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$A_{\text{внеш}}^{\min} = ?$$

Решение. Модуль заряда каждой из обкладок конденсатора

$$q = C_1 U = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U}{d_1}.$$

Энергия электростатического поля конденсатора до изменения расстояния между его обкладками

$$W_1 = \frac{q U}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2 d_1}.$$

После отключения конденсатора от источника тока заряды на его обкладках не изменяются.

Энергию электростатического поля конденсатора после увеличения расстояния между его пластинами определим следующим образом:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{(\epsilon \epsilon_0 S U)^2 d_2}{2d_1^2 \epsilon \epsilon_0 S} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2 d_2}{2d_1^2}.$$

Минимальная работа, которую необходимо совершить внешней силе, чтобы увеличить расстояние между обкладками конденсатора, равна приращению энергии электростатического поля конденсатора, так как при медленном увеличении расстояния между обкладками конденсатора их кинетическая энергия остается близкой нулю.

$$A_{\text{внеш}}^{\min} = W_2 - W_1 = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2 d_2}{2d_1^2} - \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d_1} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S U^2}{2d_1} \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right).$$

$$A_{\text{внеш}}^{\min} = \frac{2,0 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \cdot 1,00 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2 \cdot 120^2 \text{ В}^2}{2 \cdot 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} \cdot \left(\frac{2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}}{1,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}} - 1 \right) = \\ = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 0,13 \text{ мкДж}.$$

Ответ: $A_{\text{внеш}}^{\min} = 0,13 \text{ мкДж}$.

Упражнение 18

- Определите энергию электростатического поля конденсатора электроёмкостью $C = 0,20 \text{ мкФ}$, если напряжение на нём $U = 200 \text{ В}$.
- Модуль напряжённости однородного электростатического поля между обкладками плоского воздушного конденсатора $E = 200 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$. Определите расстояние между обкладками, если площадь их перекрытия $S = 100 \text{ см}^2$, а энергия электростатического поля конденсатора $W = 35,4 \text{ мкДж}$.
- 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 $\epsilon_2 = 2,5$.
- Плоский конденсатор, площадь перекрытия обкладок которого $S = 40 \text{ см}^2$, а расстояние между ними $d = 8,0 \text{ мм}$, заполнен трансформаторным маслом с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,5$. Определите энергию и модуль напряжённости электростатического поля конденсатора, если напряжение на нём $U = 200 \text{ В}$.
- 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 того, как их раздвинули.



Обобщение и систематизация знаний

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электрический заряд

Закон сохранения
электрического заряда
 $q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$

Закон Кулона

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2},$$

$$k = 8,99 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

Электроёмкость конденсатора $C = \frac{q}{U}$

Электроёмкость плоского
конденсатора

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

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

Энергия электростатического
поля конденсатора

$$W = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}$$



Задания для самоконтроля

1. Эбонитовая палочка, потёртая о шерсть, получила электрический заряд $q = -8 \cdot 10^{-14}$ Кл. Выберите верное утверждение.

- 1) На шерсть с эбонитовой палочки перешло $8 \cdot 10^{14}$ электронов.
- 2) На эбонитовую палочку с шерсти перешло $8 \cdot 10^{14}$ электронов.
- 3) На шерсть с эбонитовой палочки перешло $5 \cdot 10^5$ электронов.
- 4) На эбонитовую палочку с шерсти перешло $5 \cdot 10^5$ электронов.
- 5) На шерсть с эбонитовой палочки перешло $8 \cdot 10^5$ электронов.
- 6) На эбонитовую палочку с шерсти перешло $8 \cdot 10^5$ электронов.

2. Металлический шар, заряд которого $q = -4,8 \cdot 10^{-11}$ Кл, привели в со-прикосновение с таким же незаряженным шаром. Определите число избыточных электронов, оставшихся на первом шаре.

3. Определите, как и во сколько раз изменится модуль силы электростатического взаимодействия шариков, если заряд одного из них увеличить в $\alpha = 5,0$ раза, а расстояние между ними уменьшить в $\beta = 2,0$ раза.

4. Точечные заряды $Q_1 = 50$ нКл и $Q_2 = 80$ нКл закреплены на расстоянии $r = 2,0$ м друг от друга в вакууме. В точке пространства, находящейся на середине отрезка прямой, соединяющей заряды, расположен третий точечный заряд $Q_3 = 1,0$ нКл. Определите результирующую электростатическую силу, действующую на третий заряд.

5. Два маленьких шарика массой $m = 0,04$ кг каждый подвешены в одной точке на нитях длиной $l = 0,2$ м. При сообщении шарикам одинаковых зарядов нити разошлись на угол $\alpha = 60^\circ$. Определите модуль зарядов шариков.

6. Точечные заряды закреплены в пространстве относительно оси Ox (рис. 127). Определите координату точки, в которой напряжённость результирующего электростатического поля, создаваемого этими зарядами, принимает нулевое значение.

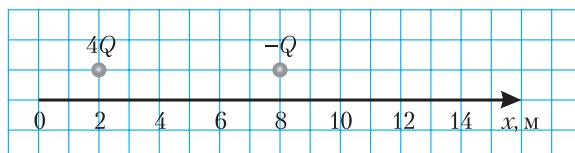


Рис. 127

7. Шарик, масса и заряд которого $m = 0,040$ г и $q = 34$ пКл соответственно, подвешен на шёлковой нити. Шарик помещают в электростатическое поле, напряжённость которого одинакова во всех точках поля и направлена горизонтально. Определите угол α отклонения нити с шариком от вертикали, если модуль напряжённости поля $E = 1,01 \cdot 10^6$ $\frac{\text{В}}{\text{м}}$.

8. 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 модуль напряжённости электростатического поля в точках, удалённых от обоих зарядов на расстояние $r = 8,0$ см.

9. В двух вершинах равностороннего треугольника со стороной длиной $a = 25$ см находятся заряды, 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.

10. Электрон, двигаясь в однородном поле, модуль напряжённости которого $E = 200 \frac{\text{В}}{\text{м}}$, переместился на расстояние $d = 25$ см. Определите изменение потенциальной и кинетической энергий электрона, если направление движения электрона: а) совпадает с направлением линий напряжённости поля; б) противоположно направлению линий напряжённости поля; в) перпендикулярно направлению линий напряжённости поля.

11. Электрон и протон из состояния покоя ускоряются в одном и том же однородном электростатическом поле до скоростей, модули которых значительно меньше скорости света. Определите отношение модуля скорости электрона к модулю скорости протона после прохождения ими одинаковых расстояний. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, а масса протона $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг.

12. Два противоположных по знаку точечных заряда, модули которых равны, находятся в воздухе. В точке пространства, находящейся на продолжении прямой, соединяющей заряды, и расположенной на расстояниях $r_1 = 10$ мм и $r_2 = 30$ мм от зарядов, потенциал электростатического поля $\varphi = 75$ мВ. Определите модуль напряжённости результирующего поля в этой точке.

13. Расстояние между точками A и B однородного электростатического поля (рис. 128), модуль напряжённости которого $E = 40 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$, составляет $r = 4,0$ см. Определите напряжение между этими точками.

14. Два маленьких шарика, электрические заряды которых $q_1 = 3,20$ нКл и $q_2 = 7,20$ нКл, находятся на расстоянии $r_1 = 40,0$ см друг от друга. Определите минимальное значение работы, которую надо совершить, чтобы сблизить шарики до расстояния $r_2 = 25,0$ см.

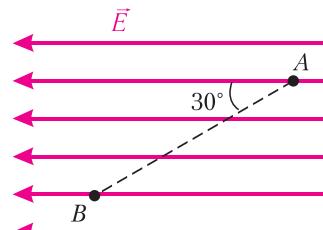


Рис. 128

15. Модули сил электростатического взаимодействия точечных зарядов, находящихся на расстоянии $r_1 = 20,0$ см в воздухе, $F_1 = F_2 = F = 90,0$ мкН, а модули сил электростатического взаимодействия этих же зарядов в некоторой среде на расстоянии $r_2 = 40,0$ см составляют $F'_1 = F'_2 = F' = 10,0$ мкН. Определите диэлектрическую проницаемость среды.

16. В однородном электростатическом поле, напряжённость которого направлена вертикально вверх, а её модуль $E = 8,0 \frac{\text{kV}}{\text{м}}$, на лёгкой непроводящей нити подвешен незаряженный шарик. Определите, во сколько раз изменится модуль силы упругости нити после сообщения шарику заряда $q = -1,8 \cdot 10^{-10}$ Кл, если его масса $m = 1,2$ мг.

17. Модуль напряжённости однородного электростатического поля $E = 120 \frac{\text{В}}{\text{м}}$. Определите, за какой промежуток времени электрон, начиная двигаться из состояния покоя, совершил в этом поле перемещение, модуль которого $\Delta r = 30$ мм. Излучением электромагнитной энергии пренебречь.

18. На рисунке 129 представлен график зависимости напряжения между обкладками конденсатора от модуля заряда на них. Определите электроёмкость конденсатора.

19. Плоский воздушный конденсатор заменили другим конденсатором такой же электрической ёмкости. У второго конденсатора площадь обкладок в $\alpha = 4$ раза меньше площади обкладок первого. Определите диэлектрическую проницаемость диэлектрика, заполняющего пространство между обкладками второго конденсатора, если расстояния между обкладками у конденсаторов одинаковые.

20. Между обкладками плоского конденсатора находится диэлектрик, диэлектрическая проницаемость которого $\epsilon = 2,0$. Конденсатор зарядили до напряжения $U_1 = 1,4$ кВ, после чего отключили от источника тока. Механическая работа, которую необходимо совершил против электрических сил, чтобы извлечь диэлектрик из конденсатора, $A_{\text{внеш}} = 10$ Дж. Определите электроёмкость конденсатора в отсутствие диэлектрика.

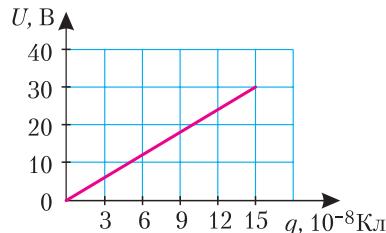


Рис. 129



ГЛАВА 4

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Постоянный ток — модель электрического тока, в которой сила тока не зависит от времени при неизменном распределении заряда в проводнике.

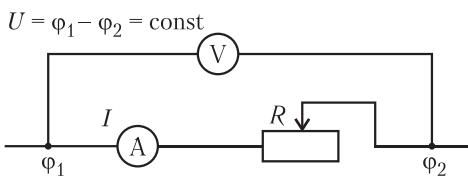
Термин «электрический ток» и определение направления тока введены Андре-Мари Ампером в 1820 г.

Электрический ток — направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц — носителей заряда.

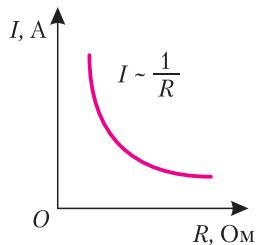
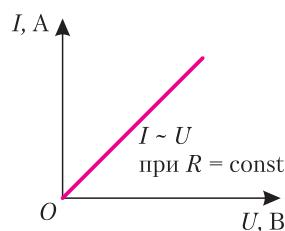
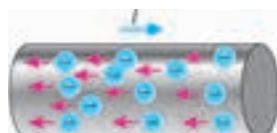
- Сила тока — физическая скалярная величина, равная отношению заряда, прошедшего через попечерное сечение проводника за некоторый промежуток времени, к этому промежутку времени.
- За направление электрического тока условно принято направление упорядоченного движения положительно заряженных частиц.
- Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку, и обратно пропорциональна его сопротивлению:

$$I = \frac{U}{R}.$$

(Закон Ома для участка электрической цепи.)

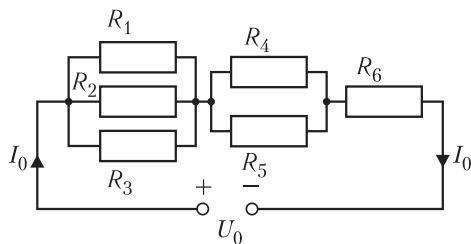


$$I = \frac{q}{t}$$



Сопротивление проводника прямо пропорционально длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения: $R = \rho \frac{l}{S}$.

Соединение проводников



последовательное

$$I_0 = I_{123} = I_{45} = I_6$$

$$U_0 = U_{123} + U_{45} + U_6$$

$$R_o = R_{123} + R_{45} + R_6$$

параллельное

$$I_{123} = I_1 + I_2 + I_3; I_{45} = I_4 + I_5$$

$$U_{123} = U_1 = U_2 = U_3; U_{45} = U_4 = U_5$$

$$\frac{1}{R_{123}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{123} = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}$$

$$\frac{1}{R_{45}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \Rightarrow R_{45} = \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5}$$

В 8-м классе вы научились собирать электрические цепи и знаете, что обязательными их звенями являются источник тока и потребитель. Источник тока обеспечивает требуемое напряжение на потребителе — устройстве, в котором необходимо создать электрический ток и использовать какие-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 характеристик электростатического поля.

§ 25. Условия существования постоянного электрического тока. Сторонние силы. ЭДС источника тока

Для возникновения электрического тока необходимо наличие свободных заряженных частиц, способных перемещаться по проводнику под действием силы электрического поля. Такой электрический ток называют током проводимости. Что же обеспечивает существование электрического тока в проводнике в течение длительного промежутка времени?



Условия существования постоянного электрического тока. Для поддержания в проводнике постоянного электрического тока необходимо, чтобы проводник являлся частью замкнутой цепи. Но вы знаете, что работа электростатического поля при перемещении электрического заряда по замкнутому контуру равна нулю. Следовательно, в цепи должен быть участок, на котором осуществляется работа по перемещению заряда против сил электрического поля. Таким участком является источник тока.

Рассмотрим замкнутую электрическую цепь, состоящую из источника тока (участок *ac*) и металлического проводника (участок *abc*) (рис. 130).

В проводнике *abc* свободные электроны под действием сил электрического поля перемещаются от точки *c* к точке *a*. Чтобы движение носителей заряда в цепи было продолжительным, электроны от точки *a* должны перемещаться к точке *c*. Самопроизвольно такое перемещение электронов происходит не может, так как на них в противоположном направлении (от точки *c* к точке *a*) действует сила электрического поля $\vec{F}_{\text{эл}}$ (см. рис. 130). Движение электронов в направлении, противоположном направлению силы электрического поля, возможно только под действием силы $\vec{F}_{\text{ст}}$ не-электростатической природы, получившей название *сторонней силы*.

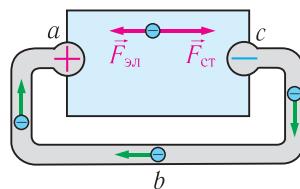


Рис. 130

Сторонние силы. Сторонние силы действуют на заряженные частицы только внутри источников тока, совершая работу по разделению положительных и отрицательных зарядов. В результате такого разделения на одном полюсе источников тока накапливаются положительные заряды, а на другом — отрицательные, что приводит к возникновению электрического поля. Это поле, действуя силой на свободные электроны, заставляет их двигаться в электрической цепи вне источника тока. Таким образом, действие электрической силы приводит

a*b**v*

Рис. 131

к соединению разноимённых зарядов и уменьшению разности потенциалов, тогда как действие сторонней силы приводит к разделению разноимённых зарядов и поддержанию разности потенциалов на полюсах источников тока.

В химических источниках тока (гальванических элементах, аккумуляторах) (рис. 131, *a*) разделение зарядов происходит при химических реакциях, в электромеханических индукционных генераторах (рис. 131, *b*) — при совершении механической работы, в солнечных батареях (рис. 131, *v*) — под воздействием энергии солнечного излучения и т. д.

Участок цепи, где заряды движутся под действием только электрической силы, называют *внешним* (различные потребители электрического тока, соединительные провода, измерительные приборы). Участок цепи, где заряды движутся под действием сторонней и электрической сил, называют *внутренним* (источник тока).

Электродвижущая сила источника тока. Основной характеристикой источника тока является *электродвижущая сила* (ЭДС)*. Обозначают её \mathcal{E} .

ЭДС — физическая скалярная величина, равная отношению работы сторонней силы по перемещению положительного электрического заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному к значению этого заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (25.1)$$

Сравнив формулы $U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}$ и (25.1), можно сделать вывод, что единицей измерения ЭДС в СИ является 1 В.

Таким образом, ЭДС численно равна работе сторонней силы 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).



* 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.

От теории к практике

Сила тока в цепи $I = 1,5$ А. Какую работу совершают сторонняя сила за промежуток времени $t = 1,0$ мин, если ЭДС источника тока $\mathcal{E} = 6,0$ В?



Для существования постоянного электрического тока в проводнике необходимо, чтобы:

- проводник являлся частью замкнутой цепи;
- цепь должна содержать источник тока, создающий и поддерживающий в проводнике электрическое поле в течение длительного промежутка времени

Внутри источника тока перенос носителей заряда против силы электрического поля осуществляет сила неэлектростатической природы, называемая сторонней силой

Участок цепи, где носители заряда движутся под действием только электрической силы, называют внешним

Участок цепи, где носители заряда движутся под действием сторонней и электрической сил, называют внутренним

ЭДС — физическая скалярная величина, равная отношению работы стороны силы по перемещению положительного электрического заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному

$$\text{к значению этого заряда: } \mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$$



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 упорядоченного движения свободных электронов на внешнем и внутреннем участках цепи?
6. Что называют ЭДС источника тока?



§ 26. Закон Ома для полной электрической цепи. КПД источника тока

В 1826 г. немецкий физик Георг Симон Ом (1787–1854) опытным путём установил, что при постоянной температуре отношение напряжения между концами металлического проводника к силе тока в нём является величиной постоянной. На основании этого был сформулирован закон, названный законом Ома для участка электрической цепи:

$I = \frac{U}{R}$, где R — сопротивление участка цепи. От чего и как зависит сила тока в замкнутой цепи, содержащей источник тока, т. е. в полной электрической цепи?

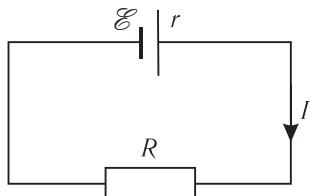


Рис. 132

Закон Ома для полной электрической цепи.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из источника тока (гальванического элемента, аккумулятора или генератора) и резистора с сопротивлением R . Известны ЭДС \mathcal{E} источника тока и его сопротивление r , которое называют внутренним. Схема цепи представлена на рисунке 132. Пусть сила тока в цепи I , а напряжение между концами проводника 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 (сопротивлением соединительных проводов пренебрегаем). Эту связь можно установить теоретически на основании закона сохранения энергии.

Если через поперечное сечение проводника за промежуток времени t проходит заряд q , то работу сторонней силы по перемещению электрического заряда можно определить по формуле

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}q.$$

Поскольку сила тока $I = \frac{q}{t}$, то

$$A_{\text{ст}} = \mathcal{E}It. \quad (26.1)$$

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 можно определить по закону Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2Rt + I^2rt. \quad (26.2)$$

На основании закона сохранения энергии:

$$A_{ct} = Q. \quad (26.3)$$

Подставим формулы (26.1) и (26.2) в равенство (26.3) и в результате математических преобразований получим:

$$\mathcal{E} = IR + Ir. \quad (26.4)$$

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 (26.4), получим:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}. \quad (26.5)$$

Формула (26.5) является математическим выражением **закона Ома для полной электрической цепи**, согласно которому **сила тока в полной электрической цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи**.

От теории к практике

Аккумулятор, внутреннее сопротивление которого $r = 0,80$ Ом, подсоединен к резистору. Чему равна ЭДС аккумулятора, если напряжение на его полюсах $U = 6,0$ В, а сила тока в цепи $I = 0,50$ А?

Различные режимы работы электрической цепи. Преобразуем формулу (26.4):

$$IR = \mathcal{E} - Ir,$$

так как $IR = U$, то

$$U = \mathcal{E} - Ir. \quad (26.6)$$

Из выражения (26.6) следует, что при разомкнутой цепи ($I = 0$) напряжение между полюсами источника тока равно его ЭДС: $U = \mathcal{E}$. Следовательно, измерить ЭДС источника тока можно, подключив к его полюсам вольтметр с бесконечно большим собственным сопротивлением (чтобы не нарушать режим разомкнутой цепи).

В случае, если сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю ($R \rightarrow 0$), 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 максимально возможную 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.

От теории к практике

Сила тока при коротком замыкании батарейки $I_{\text{к.з}} = 2$ А. Когда к батарейке подключили резистор с сопротивлением $R = 3$ Ом, сила тока стала $I = 1$ А. Как изменилось полное сопротивление цепи? Чему равно внутреннее сопротивление батарейки?

Коэффициент полезного действия источника тока. При перемещении заряда q на внешнем участке цепи, напряжение на котором U , за промежуток времени t сила электрического поля совершает работу:

$$A = Uq.$$

Используя выражение $I = \frac{q}{t}$, получим формулу для расчёта работы электрического тока, совершённой на внешнем участке цепи:

$$A = IUt.$$



Если внешним участком цепи является нагревательный элемент (или резистор), то с учётом закона Джоуля—Ленца 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 тепловом потребителе, являющемся внешним участком цепи:

$$P_{\text{полезн}} = I^2 R = I U.$$

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:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{полн}} = I \mathcal{E} = I U + I^2 r.$$

Следовательно, $P_{\text{полн}} = P_{\text{полезн}} + I^2 r$.

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока — отношение полезной мощности тока на внешнем участке цепи к полной мощности, развиваемой сторонними силами источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \, \%$$



Если внешний участок цепи — нагревательный элемент, то

$$P_{\text{полезн}} = I^2 R,$$

$$P_{\text{полн}} = I^2(R + r).$$

Тогда КПД источника тока

$$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100 \, \%$$



Закон Ома для полной электрической цепи:
сила тока в полной цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока
и обратно пропорциональна полному сопротивлению цепи: $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$

Цель разомкнута
($R \rightarrow \infty; I = 0$)
 $U = \mathcal{E}$

Напряжение между полюсами источника тока равно его ЭДС

Цель замкнута
 $U + Ir = \mathcal{E}$

Сумма напряжения на внешнем участке цепи и падения напряжения (Ir) на внутреннем участке цепи равна ЭДС источника тока

Режим короткого замыкания
(сопротивление внешнего участка цепи стремится к нулю $R \rightarrow 0$, а сила тока достигает максимального для данного источника тока значения)

$$I_{\text{К.З.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

Коэффициент полезного действия (КПД) источника тока — отношение полезной мощности тока на внешнем участке цепи к полной мощности, развиваемой сторонними силами источника тока:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \%$$



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?

Пример решения задачи

Резистор с сопротивлением $R = 3,0 \text{ Ом}$ подключён к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 8,0 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1,0 \text{ Ом}$. 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 Ома для полной цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$ получим:

$$P_{\text{полезн}} = \mathcal{E}^2 \frac{R}{(R+r)^2}.$$

$$P_{\text{полезн}} = \frac{64 \text{ В}^2 \cdot 3,0 \text{ Ом}}{(3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом})^2} = 12 \text{ Вт.}$$

КПД источника тока в данной цепи определим по формуле

$$\eta = \frac{R}{R+r} \cdot 100 \text{ \%}.$$

$$\eta = \frac{3,0 \text{ Ом}}{3,0 \text{ Ом} + 1,0 \text{ Ом}} \cdot 100 \text{ \%} = 75 \text{ \%}.$$

Ответ: $P_{\text{полезн}} = 12 \text{ Вт}$, $\eta = 75 \text{ \%}$.

**Упражнение 19**

1. Резистор с 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.

2. Реостат подключен к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 4 \text{ В}$ и внутренним сопротивлением $r = 1 \text{ Ом}$. Постройте график зависимости силы тока от сопротивления той части реостата, по которой проходит ток, $I = I(R)$.

3. При подключении к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 2,2 \text{ В}$ резистора с сопротивлением $R = 4,0 \text{ Ом}$ сила тока в цепи $I = 0,50 \text{ А}$. Определите силу тока при коротком замыкании источника тока.

4. На рисунке 133 представлен график зависимости силы тока в реостате от его сопротивления. Определите силу тока при коротком замыкании источника тока и его внутреннее сопротивление.

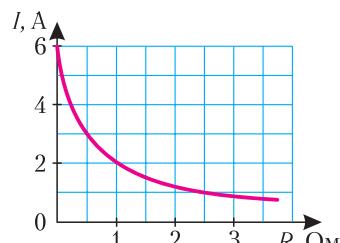


Рис. 133

5. Определите полную мощность, развиваемую источником тока с внутренним сопротивлением $r = 0,50$ Ом, при подключении к нему резистора с сопротивлением $R = 2,0$ Ом, если напряжение на резисторе $U = 4,0$ В.

6. Спираль нагревательного элемента, сопротивление которой $R = 38$ Ом, подключена к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 2,0$ Ом. Определите количество теплоты, которое выделится в спирали за промежуток времени $t = 10$ мин.

7. Два параллельно соединённых резистора, сопротивления которых $R_1 = 4,0$ Ом и $R_2 = 6,0$ Ом, подключили к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 12$ В и внутренним сопротивлением $r = 0,60$ Ом. Определите напряжение на резисторах и силу тока в каждом из них.

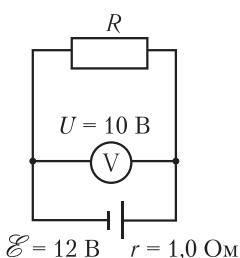


Рис. 134

8. На рисунке 134 представлена схема электрической цепи, состоящей из источника тока, резистора и идеального вольтметра. Определите работу электрического тока на внешнем участке цепи за промежуток времени $t = 10$ мин и КПД источника тока.

9. На рисунке 135 представлена схема электрической цепи, состоящей из источника тока, ключа и трёх резисторов. Выберите из предложенного перечня три верных утверждения. Укажите их номера.

1) Полезную мощность тока на внешнем участке цепи при разомкнутом ключе можно определить по

$$\text{формуле } P_{\text{полезн}} = \frac{8\mathcal{E}^2}{25R}.$$

2) Мощность, разрабатываемую сторонними силами источника тока при замкнутом ключе, можно определить по формуле $P_{\text{ст}} = \frac{\mathcal{E}^2}{3R}$.

3) Полезную работу тока на внешнем участке цепи при замкнутом ключе можно определить по формуле

$$A_{\text{полезн}} = \frac{4\mathcal{E}^2}{9R}t.$$

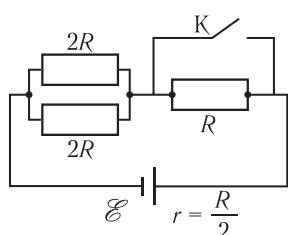


Рис. 135

4) Работу сторонних сил источника тока при разомкнутом ключе можно определить по формуле $A_{\text{ст}} = \frac{2\mathcal{E}^2}{3R}t$.

5) КПД источника тока при разомкнутом ключе $\eta = 80\%$.



ГЛАВА 5

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ



Как вы уже знаете, между заряженными телами (частицами), кроме гравитационного, существует и электромагнитное взаимодействие. Если заряды находятся 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.

§ 27. Действие магнитного поля на проводник с током. Взаимодействие проводников с током

Явления взаимодействия одноимённых и разноимённых электрических зарядов напоминают явления отталкивания одноимённых полюсов и притяжения разноимённых полюсов магнитов (рис. 136). Электрические взаимодействия осуществляются посредством электрических полей, а чем обусловлены магнитные взаимодействия и чем определяются магнитные свойства тел?

Магнитное поле. То, что магниты взаимодействуют друг с другом, что распиленный пополам магнит превращается в два магнита, а железо при соприкосновении с магнитом намагничивается, было установлено достаточно давно. Гораздо позже обнаружили связь между электрическими и магнитными явлениями, хотя намагничивание железных предметов, перемагничивание стрелки компаса во время



Рис. 136

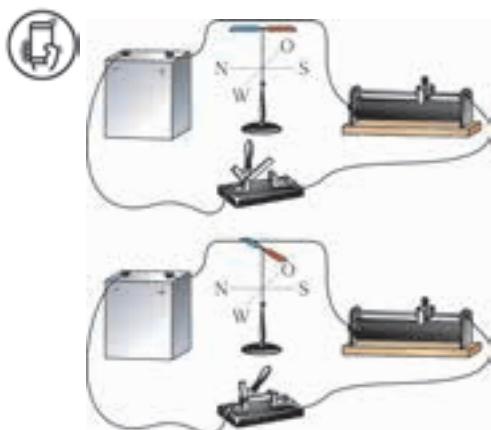


Рис. 137

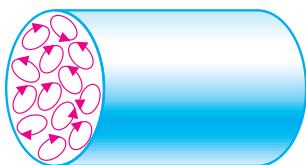


Рис. 138

взаимодействием электрического тока проводника с «амперовыми токами» в магнитной стрелке (гипотеза Ампера). Это взаимодействие осуществляется посредством *магнитного поля*.

Магнитное поле — особая форма материи, создаваемая движущимися относительно определённой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами или переменными электрическими полями.

Опыты свидетельствуют, что магнитное поле возникает при движении любых электрических зарядов.

Посредством магнитного поля осуществляется взаимодействие между подвижными электрическими зарядами (а также магнитами). При этом каждый движущийся в данной инерциальной системе отсчёта электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле. Это поле действует некоторыми силами на любые другие движущиеся электрические заряды, а также находящиеся в нём магниты.

грозовых электрических разрядов и многие другие наблюдения и опыты заставляли учёных задуматься над этим. Первыми эту связь исследовали в 1820 г. датский физик Ганс Христиан Эрстед (1777–1851) и уже известный вам французский физик и математик Андре-Мари Ампер.

Эрстед обнаружил, что магнитная стрелка, расположенная вблизи проводника, поворачивалась на некоторый угол при прохождении по проводнику электрического тока (рис. 137). 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. 138). Это означало, что магнитное взаимодействие обусловлено не особыми магнитными зарядами, а движением электрических зарядов — электрическим током.

Взаимодействие проводника с током и магнитной стрелкой в опыте Эрстеда является

Таким образом, о существовании магнитного поля можно судить по наличию силы, действующей на электрический заряд, движущийся относительно выбранной инерциальной системы отсчёта, или находящийся в этом поле магнит.

От теории к практике

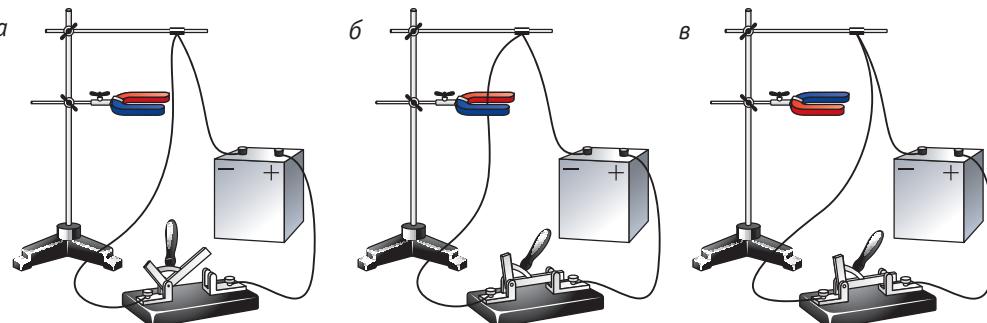
Магнитная стрелка, расположенная под медным проводником, поворачивается на некоторый угол при прохождении по нему электрического тока. Будет ли стрелка поворачиваться, если медный проводник заменить водным раствором щёлочи, помещённым в тонкую стеклянную трубку?

Интересно знать

Современные научные представления не отвергают, а наоборот, предсказывают частицы с магнитным зарядом — магнитные монополи. Однако такие частицы пока экспериментально не наблюдали.

Действие магнитного поля на проводник с током. Поскольку магнитное поле проводника с током действует 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 экспериментально.

Соберём электрическую цепь, представленную на рисунке 139, *а*. При разомкнутой цепи действия со стороны магнитного поля подковообразного магнита на гибкий проводник не наблюдается. При замыкании цепи проводник приходит в движение: он либо втягивается в пространство между полюсами подковообразного магнита (рис. 139, *б*), либо выталкивается из него (рис. 139, *в*) при противоположном расположении полюсов магнита (или при изменении направления тока). Этот опыт наглядно доказывает, что магнитное поле действует только на движущиеся заряды.



Rис. 139

Во всех рассмотренных случаях на проводники с током (движущиеся заряженные частицы) действовали *магнитные силы*, которые можно рассматривать как результат взаимодействия магнитного поля постоянного магнита с магнитными полями проводников с током (движущихся заряженных частиц).

Магнитные силы — силы, действующие со стороны магнитного поля на находящиеся в нём магниты, проводники с током или движущиеся заряды.

Взаимодействие проводников с током. Открытие Эрстеда активизировало исследования по установлению связи между электрическими и магнитными явлениями. Ампер в 1820 г. провёл ряд экспериментов по изучению взаимодействия двух гибких первоначально расположенных прямолинейно и параллельно проводников с током. Он установил, что когда ток в проводниках проходит в противоположных направлениях, они отталкиваются (рис. 140, *а*), а когда в одинаковых направлениях — притягиваются (рис. 140, *б*). При отсутствии тока в проводниках они не проявляют магнитного взаимодействия (рис. 140, *в*).

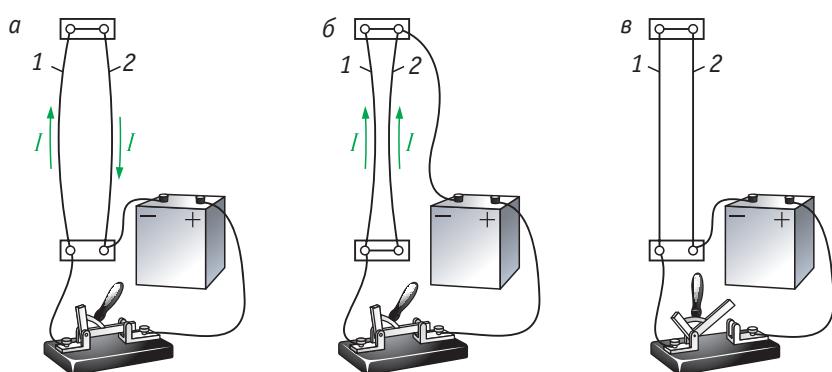


Рис. 140

Магнитное поле одного проводника с током взаимодействует с током другого проводника посредством магнитной силы.

Магнитное взаимодействие двух параллельных проводников с током используют в СИ для определения единицы силы тока — ампера.

1 ампер — это сила неизменяющегося тока, который при прохождении по каждому из двух параллельных прямолинейных проводников бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенных 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 проявляется не только в притяжении или отталкивании. Проведём опыт. Подвесим около длинного тонкого вертикально расположенного проводника на тонких и гибких подводящих проводах маленькую (по сравнению с расстоянием, на котором магнитное поле заметно изменяется, т. е. подальше от проводника) рамку (рис. 141, а). При пропускании по проводнику и рамке электрического тока рамка поворачивается и располагается так, что оказывается в одной плоскости с проводником с током (рис. 141, б). Таким образом, магнитное поле оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*, аналогичное действию на стрелку компаса.

Проведём ещё один опыт. Поместим проволочную рамку между полюсами постоянного подковообразного магнита. Если по рамке проходит ток, она устанавливается так, что её плоскость становится перпендикулярной прямой, соединяющей полюса магнита (рис. 142). В данном случае магнитное поле подковообразного магнита также оказывает на рамку с током *ориентирующее действие*.

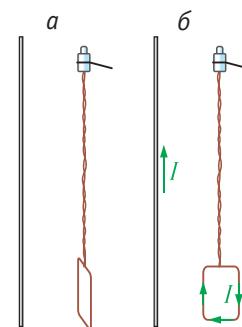


Рис. 141

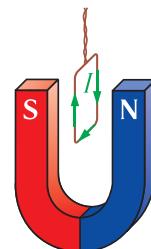


Рис. 142



Магнитное поле — особая форма материи, создаваемая движущимися относительно определённой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами или переменными электрическими полями

Каждый движущийся электрический заряд создаёт в окружающем пространстве магнитное поле, которое действует определёнными силами на любые другие движущиеся электрические заряды

Магнитные силы — силы, действующие со стороны магнитного поля на находящиеся в нём магниты, проводники с током или движущиеся заряды

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. Какой опыт доказывает, что магнитное поле действует только на движущиеся заряды?
4. Что называют магнитной силой?
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?

§ 28. Индукция магнитного поля. Линии индукции магнитного поля

Для описания электростатического поля используют его основную характеристику — напряжённость \vec{E} . Существует ли аналогичная характеристика для описания магнитного поля?



Рис. 143

Направление индукции магнитного поля. Основной характеристикой, используемой для описания магнитного поля, является физическая векторная величина — *индукция магнитного поля* \vec{B} . Зная индукцию магнитного поля, можно определить силу, действующую на проводник с током (движущийся заряд) в магнитном поле.

Для определения направления индукции магнитного поля \vec{B} используют ориентирующее действие магнитного поля на магнитную стрелку или рамку с током.

За направление индукции магнитного поля в данной точке поля принимают направление от южного полюса S к северному полюсу N свободно устанавливающейся магнитной стрелки, расположенной в рассматриваемой точке (рис. 143).

В магнитном поле прямолинейного проводника с током магнитные стрелки располагаются по касательным к окружностям (рис. 144), центры которых лежат на оси проводника.

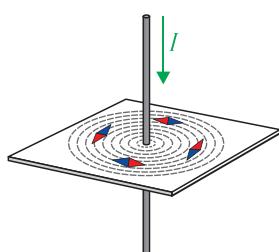


Рис. 144



На практике часто приходится иметь дело с магнитными полями электрических токов, проходящих по катушкам (соленоидам). В магнитном поле катушки с током магнитные стрелки устанавливаются по касательным к замкнутым кривым, охватывающим витки катушки (рис. 145).

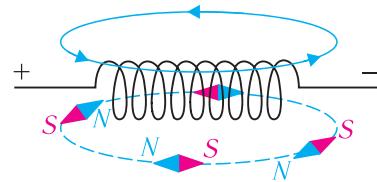


Рис. 145

Линии индукции магнитного поля. Распределение электростатического поля в пространстве можно сделать «видимым», используя представление о линиях напряжённости. Исследуя магнитное поле, создаваемое проводником с током или постоянным магнитом, с помощью магнитной стрелки в каждой точке пространства можно определить направление индукции магнитного поля. Такое исследование позволяет графически представить магнитное поле в виде **линий магнитной индукции**.

Линии индукции магнитного поля — воображаемые линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением индукции магнитного поля (рис. 146).



Рис. 146

Линии индукции магнитного поля 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.



Направление линий индукции магнитного поля. Определить направление линий индукции магнитного поля можно, используя **правило буравчика**: если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока, то рукоятка буравчика поворачивается в направлении линий индукции магнитного поля. В случае прямолинейного проводника с током линии индукции магнитного поля представляют собой концентрические окружности, которые находятся в плоскостях, перпендикулярных к проводнику (рис. 147).

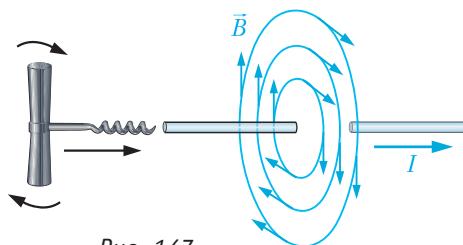


Рис. 147

Определить направление линий индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током можно также с помощью *правила правой руки*: если мысленно обхватить проводник правой рукой так, чтобы большой палец указывал направление тока, то остальные пальцы окажутся согнуты в направлении линий магнитного поля (рис. 148).

Картину линий индукции магнитного поля можно получить, используя мелкие железные опилки, которые в магнитном поле ведут себя как магнитные стрелки. На рисунке 149 представлена картина магнитного поля прямолинейного участка проводника с током. Картину магнитного поля кругового витка с током и графическое изображение линий индукции представлены на рисунках 150, а, б.

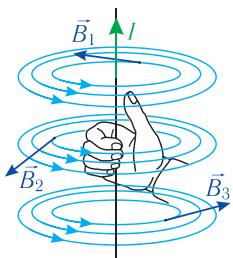


Рис. 148



Рис. 149

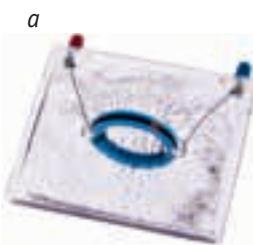


Рис. 150, а

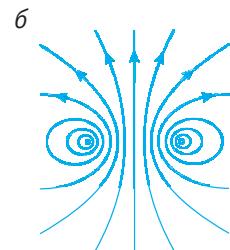
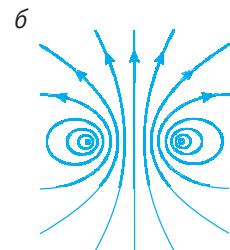
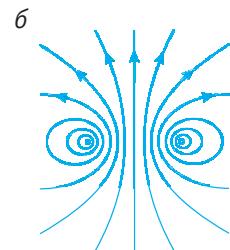


Рис. 150, б

Полагают, что линии индукции магнитного поля, созданного постоянным магнитом, направлены внутри магнита от его южного полюса S к северному N (рис. 151).

Магнитное поле соленоида подобно полю полосового магнита. На рисунках 152, а, б представлена картина магнитного поля соленоида с током и дано графическое изображение линий индукции. Соленоид представляет собой цилиндрическую катушку, на которую виток к витку намотан провод, изолированный тонким слоем лака. Если длина соленоида много больше его диаметра, то внутри центральной части соленоида линии индукции магнитного поля практически параллельны и направлены вдоль его оси.

Однородное магнитное поле — поле, индукция которого во всех точках пространства одинакова.

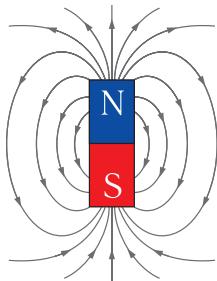
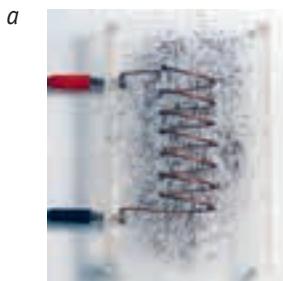
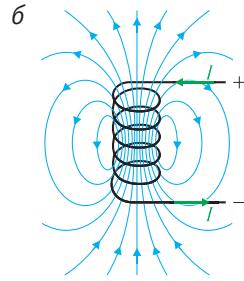


Рис. 151



а



б

Рис. 152

Линии индукции такого поля параллельны. В противном случае поле называют неоднородным. Магнитное поле внутри длинного соленоида практически однородно, а вблизи краёв — неоднородно. Неоднородно и магнитное поле прямолинейного проводника с током (см. рис. 148).

Для наглядности на рисунках линии индукции изображают гуще в тех местах магнитного поля, где больше значение индукции магнитного поля (рис. 152, б). При этом на линии

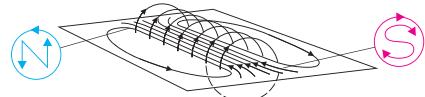


Рис. 153

индукции указывают стрелкой направление индукции магнитного поля. Для крайних витков соленоида *магнитное поле «кругового» витка с током, проходящим в направлении движения часовой стрелки, эквивалентно полюю южного полюса постоянного магнита, а магнитное поле «кругового» витка с током, проходящим против направления движения часовой стрелки, эквивалентно полюю северного полюса постоянного магнита (правило часовой стрелки)* (рис. 153).

От теории к практике

На рисунке 154 схематически изображено магнитное поле кругового витка с током. Однородно ли такое магнитное поле? Почему?

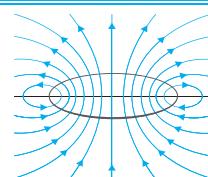


Рис. 154

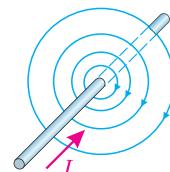


Рис. 155

Определение направления индукции магнитного поля. Для определения направления индукции магнитного поля 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 изображён прямолинейный проводник с током, расположенный перпендикулярно плоскости страницы (рис. 155), и при этом ток направлен от читателя, то его условно обозначают крестиком (рис. 156, а); в случае, если ток направлен к читателю, — точкой (рис. 156, б). Так же (точкой или крестиком) обозначают направления векторов (индукции магнитного поля, силы и др.), расположенных перпендикулярно плоскости рисунка.

Полюсы соленоида, а следовательно, и направление индукции магнитного поля можно определить по правилу часовой стрелки (см. рис. 153) или правилу буравчика: если направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением тока в витке,

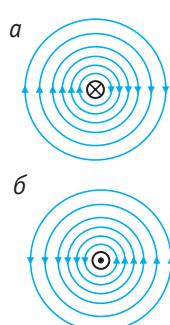


Рис. 156

то поступательное движение остряя буравчика укажет направление индукции магнитного поля внутри соленоида, а следовательно, и положение его северного полюса.



Линии индукции магнитного поля — воображаемые линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением индукции магнитного поля



Линии индукции магнитного поля

непрерывны (не имеют ни начала, ни конца), замыкаются сами на себя

не пересекаются, так как в любой точке пространства индукция магнитного поля имеет определённое направление

направление индукции магнитного поля определяют по:
— правилу буравчика,
— правилу правой руки,
— правилу часовой стрелки

Магнитное поле, индукция которого во всех точках пространства одинакова, называют однородным магнитным полем



1. Какие правила используют для определения направления индукции магнитного поля?
2. Как графически изображают магнитное поле? Что называют линиями индукции магнитного поля?
3. Какова картина линий индукции магнитного поля прямолинейного проводника с током? кругового витка с током? катушки с током? Как определяют направление линий индукции магнитного поля?
4. Какие поля называют вихревыми?
5. В чём отличие магнитного поля от электростатического?
6. Какое магнитное поле называют однородным?

Примеры решения задач

Пример 1. Электроны, образующие «электронный луч», движутся так, как изображено на рисунке 157, а. Определите направление линий индукции магнитного поля, созданного этими электронами.

Решение. Определить направление линий индукции магнитного поля, созданного движущимися электронами, 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. Тогда, если смотреть на линию индукции по направлению движения электронов, она будет ориентирована против направления движения часовой стрелки (рис. 157, б).

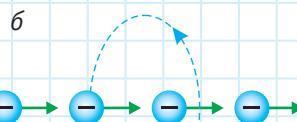
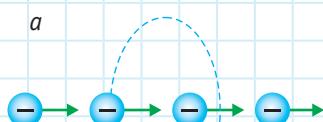


Рис. 157

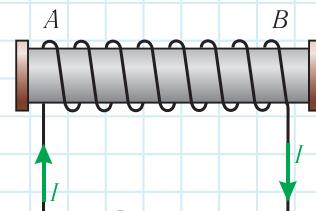


Рис. 158

Пример 2. На рисунке 158 указано направление электрического тока в соленоиде. Определите магнитные полюсы соленоида.

Решение. 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 20

1. Как направлены линии индукции магнитного поля, создаваемого прямолинейным проводником с током, изображённые на рисунке 159, *a*. В каком направлении проходит электрический ток в проводнике, изображённом на рисунке 159, *б*?

2. Как поведёт себя магнитная стрелка, если рядом с ней расположить прямолинейный проводник с электрическим током (рис. 160)?

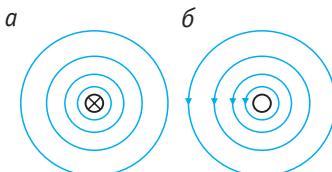


Рис. 159

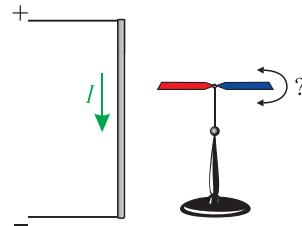


Рис. 160

3. По круговому витку проходит электрический ток (рис. 161). Как расположится магнитная стрелка, если её поместить в центр витка? Действие магнитного поля Земли не учитывать.

4. Как будут взаимодействовать две катушки, подвешенные на тонких проводах, если их подключить к источникам тока так, как изображено на рисунке 162?

5. При подключении соленоида к полюсам источника тока он отталкивается от расположенного вблизи постоянного магнита (рис. 163). В каком направлении идёт ток в соленоиде?

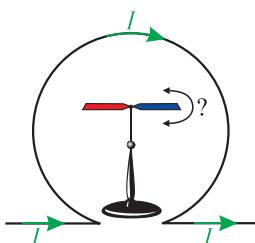


Рис. 161

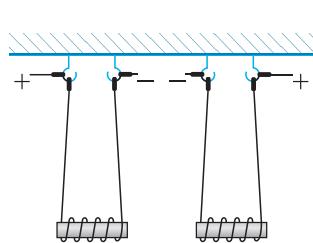


Рис. 162

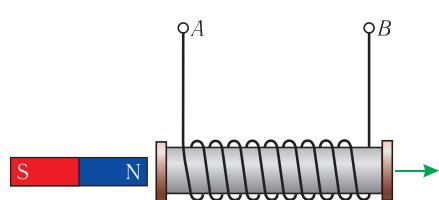


Рис. 163

§ 29. Сила Ампера.

Принцип суперпозиции магнитных полей

Для количественного описания магнитного поля необходимо знать не только направление индукции магнитного поля, но и её модуль. Характеристики электростатического поля определяют с помощью пробного заряда. Для определения характеристик магнитного поля используют «пробный» ток, который представляет собой малый участок проводника (элемент тока).

Модуль индукции магнитного поля. Действие магнитного поля на находящийся в нём малый участок проводника с током экспериментально исследовал Ампер, осуществив опыты с различными проводниками, входящими в замкнутые электрические цепи. В 1820 г. Ампер установил, что модуль силы, которой однородное магнитное поле действует на прямолинейный участок проводника с током, зависит от величин, характеризующих этот проводник. Этими величинами являются сила тока I , проходящего по проводнику, и длина l прямолинейного участка проводника. Кроме того, оказалось, что модуль магнитной силы зависит от угла между направлениями тока в проводнике и индукции магнитного поля \vec{B} . Причём при определённых силах тока и длине проводника модуль



магнитной силы максимальен, когда проводник расположен перпендикулярно направлению индукции магнитного поля.

Из опытов следует, что 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 максимального значения силы, действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока в нём и длины этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}. \quad (29.1)$$

Таким образом, в каждой точке магнитного поля могут быть определены как направление индукции магнитного поля, так и её модуль.

В СИ индукцию магнитного поля измеряют в теслах (Тл) в честь сербского инженера и изобретателя Николы Теслы (1856–1943), с 1884 г. работавшего в США.

1 Тл — индукция однородного магнитного поля, в котором на прямолинейный участок проводника длиной 1 м при силе тока в нём 1 А действует со стороны поля максимальная сила, модуль которой 1 Н.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с}^2}.$$

От теории к практике

Прямолинейный проводник длиной $\Delta l = 40$ см находится в однородном магнитном поле. Сила тока, проходящего по проводнику, $I = 4,0$ А. Чему равен модуль магнитной индукции, если модуль максимальной силы, действующей на проводник со стороны магнитного поля, $F_{\max} = 48$ мН?



Закон Ампера. Из выражения (29.1) следует, что максимальное значение силы Ампера:

$$F_{\max} = BI\Delta l.$$

Экспериментально доказано, что в общем случае модуль силы Ампера можно рассчитать по формуле

$$F_A = BI\Delta l \sin\alpha. \quad (29.2)$$

Выражение (29.2) называют *законом Ампера*.

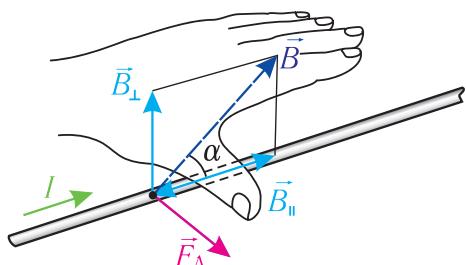


Рис. 164

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 укажет направление силы Ампера, действующей на прямолинейный участок проводника с током (рис. 164).

От теории к практике

1. На прямолинейный проводник с током, расположенный перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного магнитного поля с индукцией B , действует магнитная сила \vec{F} .

а) Как изменяется модули индукции однородного магнитного поля B и силы Ампера F_A , если силу тока в проводнике увеличить в 2,5 раза?

б) Как изменится модуль силы F_A , если проводник расположить параллельно линиям магнитной индукции?

2. 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?



Принцип суперпозиции магнитных полей. В случае, когда магнитное поле создаётся несколькими источниками, 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):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Индукция магнитного поля — физическая векторная величина, модуль которой равен отношению максимального значения силы, действующей со стороны однородного магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока в нём и длины этого участка:

$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}$$

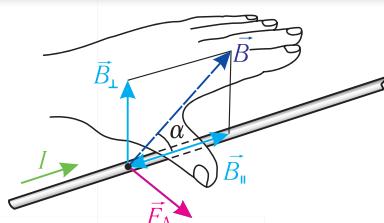
Принцип суперпозиции: если магнитное поле в некоторой точке пространства создаётся не одним, а несколькими электрическими токами (или движущимися зарядами), то индукция результирующего магнитного поля в этой точке равна векторной сумме индукций магнитных полей, созданных каждым током (или движущимся зарядом):

$$B = B_1 + B_2 + \dots + B_n$$

Модуль силы, действующей на прямолинейный проводник с током со стороны однородного магнитного поля (модуль силы Ампера), можно рассчитать по формуле

$$F_A = B I \Delta l \sin \alpha,$$

где α — угол между направлениями тока и индукции магнитного поля



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 укажет направление силы Ампера, действующей на участок проводника с током



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 индукции магнитного поля модуль силы, действующей на проводник с током со стороны поля, максимальен? равен нулю?
4. Как определить направление силы Ампера?
5. Сформулируйте принцип суперпозиции магнитных полей.



Пример решения задачи

В однородном магнитном поле, индукция которого направлена вертикально и её модуль $B = 0,50 \text{ Тл}$, на лёгких проводах горизонтально подвешен прямолинейный металлический стержень длиной $l = 0,20 \text{ м}$ и массой $m = 50 \text{ г}$. Сила тока, проходящего по стержню, $I = 5,0 \text{ А}$. Определите, на какой угол от вертикали отклонились провода, поддерживающие стержень. Воздействием магнитного поля на ток в подводящих проводах пренебречь.

Дано:

$$B = 0,50 \text{ Тл}$$

$$l = 0,20 \text{ м}$$

$$m = 50 \text{ г} =$$

$$= 0,050 \text{ кг}$$

$$I = 5,0 \text{ А}$$

$\alpha - ?$

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. 165). 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 165 следует:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_A}{mg} = \frac{BIl}{mg}.$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{0,50 \text{ Тл} \cdot 5,0 \text{ А} \cdot 0,20 \text{ м}}{0,050 \text{ кг} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}} = 1,0,$$

следовательно, $\alpha = 45^\circ$.

Ответ: $\alpha = 45^\circ$.

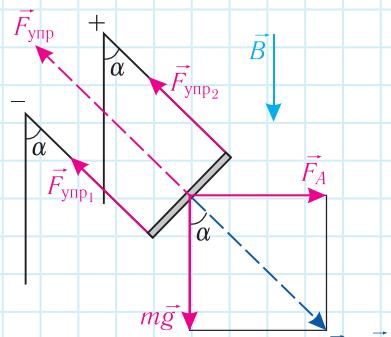


Рис. 165

Упражнение 21

1. Прямолинейный проводник длиной $l = 40 \text{ см}$ находится в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,50 \text{ Тл}$. Сила тока в проводнике $I = 8,0 \text{ А}$. Определите наибольшее и наименьшее значения 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 $F = 0,64$ Н.

3. Прямолинейный проводник длиной $l = 50$ см расположен перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля (рис. 166). Сила тока в проводнике $I = 2,0$ А. На проводник со стороны магнитного поля действует сила, модуль которой $F = 0,40$ Н. Определите модуль и направление индукции магнитного поля.

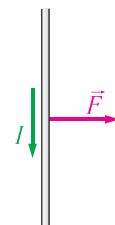


Рис. 166

4. Сила тока в прямолинейном проводнике, площадь поперечного сечения которого $S = 0,10$ см², составляет $I = 3,9$ А. В однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 0,20$ Тл, на проводник 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. Магнитное поле образовано наложением двух однородных магнитных полей, модули индукций которых $B_1 = 0,03$ Тл и $B_2 = 0,04$ Тл. Определите модуль индукции результирующего поля, если линии индукций суперпозирующих полей взаимно перпендикулярны.

6. Магнитное поле, модуль индукции которого $B = 0,03$ Тл, образовано наложением двух однородных магнитных полей. Определите максимально возможное значение индукции первого поля, если модуль индукции второго поля $B_2 = 0,02$ Тл.

7. 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.



§ 29-1

§ 30. 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 частиц. Таким образом, силу Ампера можно рассматривать как результат сложения сил, действующих на отдельные движущиеся заряженные частицы. Как можно определить силу, действующую со стороны магнитного поля на заряженную частицу, движущуюся в этом поле?

Сила Лоренца. Силу, которой магнитное поле действует на заряженную частицу, движущуюся в этом поле, называют *силой Лоренца* в честь выдающегося нидерландского физика Хендрика Антона Лоренца (1853–1928).

Модуль силы Лоренца можно определить

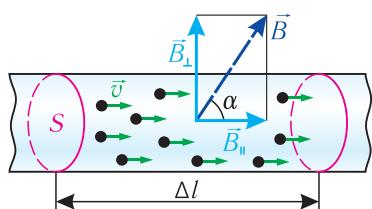


Рис. 167

по формуле $F_{\text{Л}} = \frac{F_A}{N}$, где N — общее число свободных заряженных одинаковых частиц на прямолинейном участке проводника длиной Δl (рис. 167). 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

$$F_{\text{Л}} = \frac{BI\Delta l \sin \alpha}{N} = \frac{BNq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t N} = \frac{Bq\Delta l \sin \alpha}{\Delta t}.$$

Поскольку $\frac{\Delta l}{\Delta t} = v$ — модуль средней скорости упорядоченного движения заряженной частицы в стационарном* электрическом поле внутри проводника, то формулу для определения модуля силы Лоренца можно записать в виде:

$$F_{\text{Л}} = Bqv \sin \alpha, \quad (30.1)$$

где α — угол между направлениями индукции магнитного поля \vec{B} и скорости \vec{v} упорядоченного движения заряженной частицы.

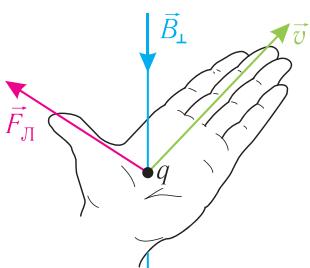


Рис. 168

Из формулы (30.1) следует, что сила Лоренца максимальна в случае, когда заряженная частица движется перпендикулярно направлению индукции магнитного поля ($\alpha = 90^\circ$). Когда частица движется вдоль линии индукции поля ($\alpha = 0^\circ$ или $\alpha = 180^\circ$), сила Лоренца на неё не действует. Сила Лоренца зависит от выбора инерциальной системы отсчёта, так как в разных системах отсчёта скорость движения заряженной частицы может отличаться.

Направление силы Лоренца, действующей на заряженную частицу, как и направление силы Ампера,

* Электрическое поле, создаваемое и поддерживаемое источником тока в течение длительного промежутка времени и обеспечивающее постоянный электрический ток в проводнике, называют стационарным электрическим полем.

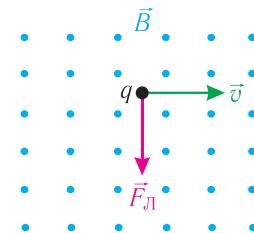
определяют по **правилу левой руки** (рис. 168): если левую руку расположить так, чтобы составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная скорости движения частицы, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (против движения отрицательно заряженной частицы), то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец укажет направление действующей на частицу силы Лоренца.

Сила Лоренца перпендикулярна как направлению скорости \vec{v} движения частицы, так и направлению индукции \vec{B} магнитного поля.

От теории к практике

На рисунке 169 представлены направления индукции \vec{B} магнитного поля, скорости \vec{v} движения частицы в данный момент времени и силы Лоренца \vec{F}_L , действующей на частицу со стороны магнитного поля. Определите знак заряда частицы.

Рис. 169



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 однородного магнитного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$, $\alpha = 90^\circ$), то траекторией движения заряженной частицы является окружность (рис. 170).

Пусть в однородном магнитном поле, индукция которого \vec{B} , движется частица со скоростью \vec{v} , направленной перпендикулярно линиям индукции. Масса частицы m и заряд q . Так как сила Лоренца \vec{F}_L перпендикулярна скорости \vec{v} движения частицы (см. рис. 170), то эта сила изменяет только направление скорости, сообщая частице центростремительное ускорение, модуль которого согласно второму закону Ньютона:

$$a = \frac{F_L}{m} = \frac{Bqv}{m}.$$

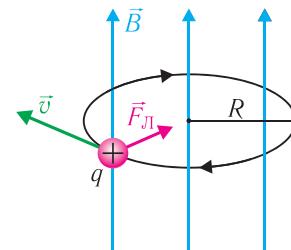


Рис. 170

В результате частица движется по окружности, радиус которой можно определить из формулы $a = \frac{v^2}{R}$:

$$R = \frac{v^2}{a} = \frac{v^2 m}{Bqv} = \frac{mv}{Bq}.$$

Период T обращения частицы, движущейся по окружности в однородном магнитном поле:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{mv}{Bq} = \frac{2\pi m}{Bq}. \quad (30.2)$$

Как следует из выражения (30.2), период обращения частицы не зависит от модуля скорости её движения и радиуса траектории, а определяется только модулем заряда частицы, её массой и значением индукции магнитного поля.

От теории к практике

В однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 4,0$ мТл, перпендикулярно линиям индукции поля движется электрон. Чему равен модуль ускорения электрона, если модуль скорости его движения $v = 2,5 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{s}}$? Масса и модуль заряда электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг и $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл соответственно.



Интересно знать

Поскольку сила Лоренца направлена под углом 90° к скорости движения заряженной частицы в каждой точке траектории (рис. 171), то работа этой силы при 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 разгон, возможно под действием электрического поля (в этом случае изменение кинетической энергии частицы равно работе силы поля). Поэтому в современных ускорителях (рис. 172) заряженных частиц электрическое поле используют для ускорения, а магнитное — для «формирования» траектории движения заряженных частиц.

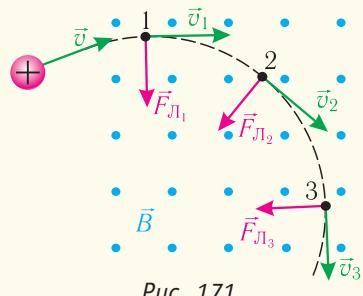


Рис. 171



Рис. 172



Силу, которой магнитное поле действует на заряженную частицу, движущуюся в этом поле, называют силой Лоренца

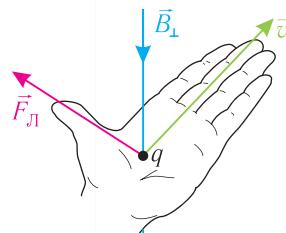
Модуль силы Лоренца:

$$F_L = B|q|v \sin \alpha$$

Если в данной инерциальной системе отсчёта скорость движения заряженной частицы перпендикулярна индукции однородного магнитного поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$), то траекторией движения частицы является окружность

Период обращения частицы не зависит от скорости её движения и радиуса траектории, а определяется только модулем её заряда, массой и значением индукции магнитного поля:

$$T = \frac{2\pi m}{B|q|}$$



Направление силы Лоренца определяют по правилу левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная скорости движения частицы, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (против движения отрицательно заряженной), то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец укажет направление действующей на частицу силы Лоренца



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. От чего зависит период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле?



Пример решения задачи

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:

$$R = 12 \text{ см} =$$

$$= 0,12 \text{ м}$$

$$B = 0,020 \text{ Тл}$$

$$p = ?$$

Решение. По определению 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.

$$\text{Следовательно, } p = m \frac{BeR}{m} = BeR.$$

$$p = 0,020 \text{ Тл} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,12 \text{ м} = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{Кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$

$$\text{Ответ: } p = 3,8 \cdot 10^{-22} \frac{\text{Кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}.$$



Упражнение 22

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 $B = 1,6$ мТл. Определите модуль силы, действующей на электрон в магнитном поле.

2. Электрон движется в однородном магнитном поле по окружности, радиус которой $R = 8,0$ мм. Определите модуль индукции магнитного поля, если модуль скорости движения электрона $v = 4,0 \cdot 10^6 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

3. Пылинка движется в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 1,0$ Тл, перпендикулярно линиям индукции. Масса и заряд пылинки $m = 0,80$ мг и $q = 1,6$ нКл соответственно. Определите период обращения пылинки.

4. Электрон движется в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 2,0$ мТл, по окружности радиусом $R = 2,0$ см. Определите кинетическую энергию электрона. Масса электрона $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

5. Определите, какую ускоряющую разность потенциалов должна пройти из состояния покоя частица, чтобы в однородном магнитном поле, модуль индукции которого $B = 80$ мТл, на неё действовала сила Лоренца, модуль которой $F = 20$ мкН. Масса частицы $m = 12$ мг, её заряд $q = 3,0$ мКл. В магнитное поле частица влетает перпендикулярно линиям индукции.



§ 31. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции

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. Фарадей 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, ввели физическую величину, которую назвали *магнитным потоком* (потоком индукции магнитного поля).

Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля (рис. 173):

$$\Phi = BS \cos \alpha. \quad (31.1)$$

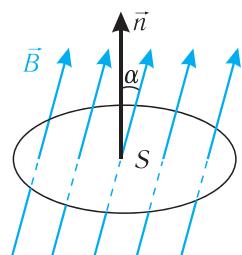


Рис. 173

Единицей магнитного потока в СИ является вебер (Вб). 1 Вб — магнитный поток однородного магнитного поля индукцией 1 Тл через плоскую поверхность, расположенную перпендикулярно индукции магнитного поля, площадь которой 1 м².

Формула (31.1) позволяет сделать вывод, что магнитный поток зависит от взаимной ориентации линий индукции магнитного поля и нормали к плоской поверхности. Магнитный поток максимальен, 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 магнитный поток через неё равен нулю.

На практике часто встречаются ситуации, когда линии индукции магнитного поля пересекают поверхности, ограниченные не одним контуром, а несколькими. Так, например, линии 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, изменения: 1) индукцию магнитного поля, в котором находится контур; 2) размеры этого контура; 3) ориентацию контура в магнитном поле.

От теории к практике

Квадратная проволочная рамка со стороной длиной $a = 4$ см помещена в однородное магнитное поле, линии индукции которого перпендикулярны плоскости рамки, а модуль индукции $B = 0,5$ Тл. Какова убыль магнитного потока через поверхность, ограниченную рамкой, при её повороте на угол $\beta = 90^\circ$?

Явление электромагнитной индукции. В 1831 г. Фарадей провёл серию опытов, которые позволили установить следующие факты:

1) 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 происходило, если

магнит был неподвижен, а двигали катушку (рис. 174);

2) в катушке, подключённой к гальванометру, возникал электрический ток, если относительно неё двигали другую катушку, которая была подключена к источнику постоянного тока (рис. 175);

3) 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. 176).

Во всех рассмотренных случаях электрический ток в цепи гальванометра возникал только при изменении магнитного потока через поверхности, ограниченные витками катушки, подключённой к гальванометру (рис. 177). Причём значение силы тока, возникающего в контуре, не зависело от способа изменения магнитного потока, а определялось только скоростью его изменения. Назвали такой ток индукционным током.

Индукционный ток — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

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. Этую ЭДС назвали **электродвигущей силой индукции** или **ЭДС индукции**. Если цепь замкнута, ЭДС индукции создаёт индукционный ток, т. е. возникновение индукционного тока является вторичным эффектом.

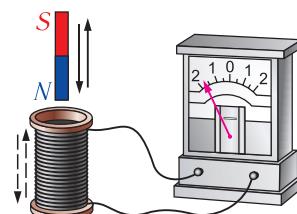


Рис. 174



Рис. 175

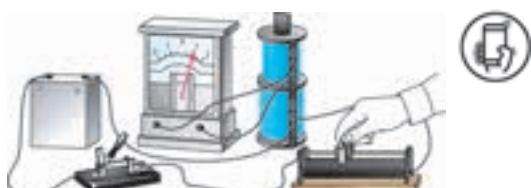


Рис. 176

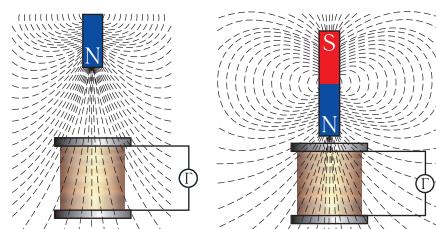


Рис. 177

Электромагнитная индукция — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоятся в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется.

От теории к практике

1. Что изменилось бы в опытах Фарадея, если бы он использовал катушки с большим количеством витков?

2. Отличается ли электрический ток, индуцированный в проводнике, от электрического тока, создаваемого любым другим источником, например гальваническим элементом?



«Превратить магнетизм в электричество»

Возникновение электрического тока при относительном движении катушки и магнита (другой катушки)

Возникновение электрического тока в одной катушке при изменении тока в другой катушке

Индукционный ток — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром

Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Электромагнитная индукция — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоятся в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется

Из истории физики

Один из историков науки писал: «...работы других учёных — Кулона, Гальвани, Эрстеда, Араго, Ампера — представляли собой отдельные пики, тогда как Фарадей воздвиг “горную цепь” из взаимосвязанных работ».



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?



§ 32. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции

Открыв явление электромагнитной индукции, Фарадей практически за полтора месяца установил все его существенные закономерности. 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 устройство, позволяющее преобразовывать механическую энергию в электрическую.

Направление индукционного тока. Опыты Фарадея показали, что направление индукционного тока, вызванного возрастанием магнитного потока, 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 (правило Ленца):** возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемый им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, вызывающему 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.

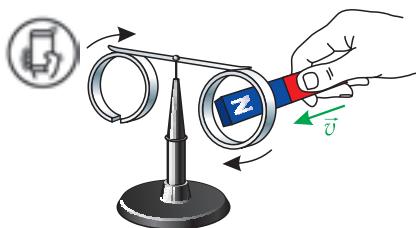


Рис. 178

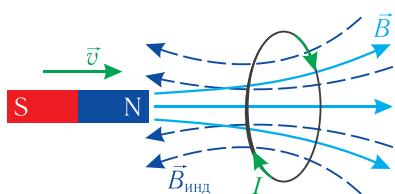


Рис. 179

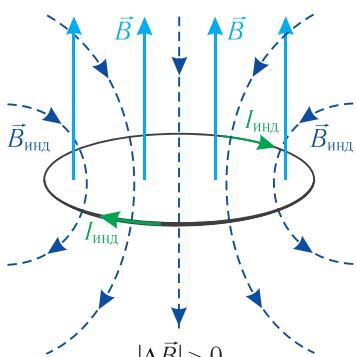


Рис. 180

Приращение 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 — противоположны;

4) зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$, по правилу буравчика (правилу часовой стрелки) определить направление индукционного тока.

От теории к практике

Изменится ли направление индукционного тока (см. рис. 178), если магнит приближать к кольцу южным полюсом? Если изменится, то как?

Правило Ленца можно проиллюстрировать, используя два алюминиевых кольца (одно из них с разрезом), закреплённых на стержне, свободно вращающемся вокруг вертикальной оси (рис. 178). Из опыта следует, 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. 179). При удалении 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 (рис. 180):

- 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

если $\Delta\Phi > 0$, то направления индукций внешнего магнитного поля \vec{B} и магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$ совпадают, если $\Delta\Phi < 0$, то направления индукций внешнего магнитного поля \vec{B} и магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$ противоположны;

- 4) зная направление линий индукции магнитного поля индукционного тока $\vec{B}_{\text{инд}}$, по правилу буравчика (правилу часовой стрелки) определить направление индукционного тока.

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.

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.

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.1)$$

Чтобы обеспечить строгое равенство в выражении (32.1), 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

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.2)$$

Таким образом, ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком.

Выражение (32.2) 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.

Зная ЭДС индукции, можно определить силу индукционного тока. 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.

От теории к практике

На рисунке 181 представлен график зависимости магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, от времени. Определите ЭДС индукции в моменты времени $t_1 = 30$ мс и $t_2 = 60$ мс.

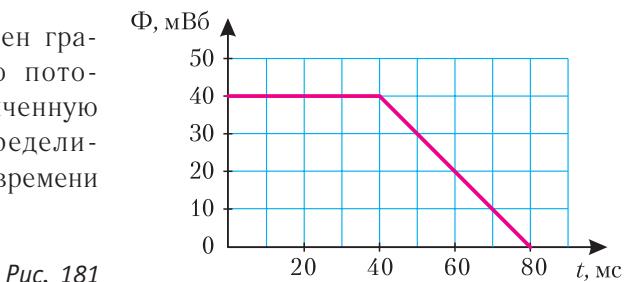


Рис. 181



Возникающий в замкнутом проводящем контуре индукционный ток имеет такое направление, при котором создаваемый им магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток (правило Ленца)

ЭДС электромагнитной индукции в контуре равна скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, взятой с противоположным знаком (закон электромагнитной индукции Фарадея):

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$



1. Как формулируют правило Ленца?
2. Как объяснить результаты опытов со сплошным алюминиевым кольцом и движущимся постоянным магнитом?
3. Как определяют направление индукционного тока?
4. Каково направление индукционного тока в сплошном алюминиевом кольце, к которому подносят магнит (рис. 182)? Как будет двигаться кольцо? Что будет, если магнит подносить к кольцу с разрезом?
5. Как формулируют закон электромагнитной индукции?
6. Почему в формуле, являющейся математическим выражением закона электромагнитной индукции, стоит знак «минус»?

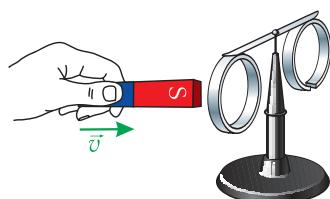


Рис. 182



Пример решения задачи

Определите направление индукционного тока в соленоиде, изображённом на рисунке 183.

Решение. При приближении северного полюса магнита к соленоиду в нём индуцируется электрический ток такого направления, при котором ближайший к магниту конец соленоида приобретает свойства северного магнитного полюса.

Определяя направление тока по правилу буравчика (правилу часовой стрелки), отмечаем, что ток в соленоиде направлен 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*.

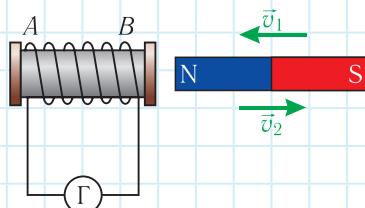


Рис. 183

Упражнение 23

1. На рисунках 184, *a*, *b* стрелками показаны направления индукционных токов в соленоидах. Определите направления движения магнитов в каждом случае.

2. 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 индукции магнитного поля параллельны нормали к этой поверхности; б) поверхность, ограниченная контуром, параллельна линиям индукции магнитного поля; в) линии индукции магнитного поля образуют угол $\alpha = 30^\circ$ с этой поверхностью.

3. 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.

4. 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.

5. 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 $\Delta t = 5,0$ мс индуцируется ЭДС $\mathcal{E}_{\text{инд}} = 20$ В.

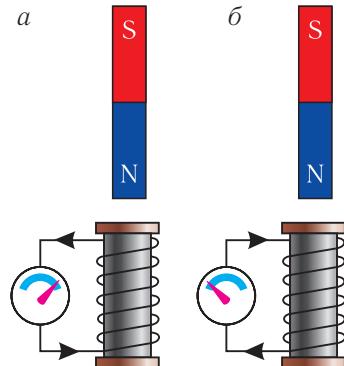


Рис. 184



§ 33. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля катушки с током

Фарадей опытным путём установил, что 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 электромагнитных эффектов. В 1829 г. Генри обнаружил, что ЭДС индукции возникает в неподвижном контуре и в отсутствие изменения внешнего магнитного поля. Каков механизм возникновения ЭДС индукции в этом случае?

Самоиндукция. Если электрический ток, проходящий в замкнутом проводящем контуре, по каким-либо причинам изменяется, то изменяется и магнитное поле, создаваемое этим током. Это влечёт за собой изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром. Поскольку магнитный поток Φ пропорционален модулю магнитной индукции B поля, который, в свою очередь, пропорционален силе тока I в контуре, то

$$\Phi \sim I.$$

Коэффициенту пропорциональности между магнитным потоком Φ и силой тока I Томсон (lord Кельвин) в 1853 г. предложил название «коэффициент самоиндукции»:

$$\Phi = LI. \quad (33.1)$$

Коэффициент самоиндукции L часто называют *индуктивностью* контура. В СИ индуктивность 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.

Если электрический ток, проходящий в контуре, изменяется, то он создаёт изменяющийся магнитный поток, что приводит к появлению ЭДС индукции. Это явление называли *самоиндукцией*.

Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи.

Возникающую в этом случае ЭДС назвали *электродвижущей силой самоиндукции*. Согласно закону электромагнитной индукции,

$$\mathcal{E}_c = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Delta(LI)}{\Delta t}.$$

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 тока самоиндукции можно определить по закону Ома $I_c = \frac{\mathcal{E}_c}{R}$, где R — сопротивление контура. Согласно правилу Ленца, ток самоиндукции всегда направлен так, чтобы противодействовать изменению тока, создаваемого источником. При возрастании силы тока ток самоиндукции направлен против тока источника, а при уменьшении — направления тока источника и тока самоиндукции совпадают.

От теории к практике

Какой должна быть скорость изменения силы тока, чтобы в катушке с индуктивностью $L = 0,20$ Гн возникла ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 4,0$ В?

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. Схема цепи представлена на рисунке 185. При замыкании ключа лампочка L_2 начинает светиться практически сразу, а лампочка L_1 — с заметным запаздыванием. При возрастании силы тока I_1 , созданного источником на участке, образованном катушкой и лампочкой 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 I_1 источника замедляется, и сила тока $I_1 = |I_c|$ не сразу достигает своего максимального значения.

Энергия магнитного поля. Явление самоиндукции можно наблюдать и при размыкании электрической цепи. Если включить лампочку параллельно катушке

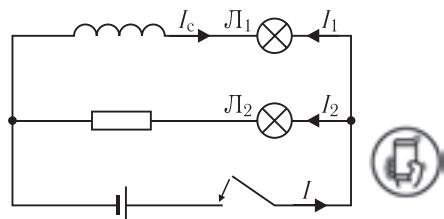


Рис. 185



в электрическую цепь постоянного тока, то при размыкании цепи 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.

Откуда берётся энергия, обеспечивающая вспышку лампочки? Это не энергия источника тока, так как он уже отсоединен. 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.

Расчёты подтверждают, что энергию магнитного поля можно определить по формуле

$$W_m = \frac{LI^2}{2},$$

где L — индуктивность контура; I — сила тока.

От теории к практике

Какова индуктивность катушки, если при силе тока $I = 2,0$ А энергия магнитного поля катушки $W_m = 1,2$ Дж?



Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи

ЭДС самоиндукции прямо пропорциональна индуктивности контура (катушки) и скорости изменения силы тока в нём:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Явление самоиндукции происходит при изменении силы тока в цепи, содержащей индуктивность

Энергия магнитного поля катушки с током пропорциональна квадрату силы тока:

$$W_m = \frac{LI^2}{2}$$



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 в СИ её измеряют?
5. Как вычислить энергию магнитного поля катушки с током?



Примеры решения задач

Пример 1. На рисунке 186 представлен график зависимости силы тока, проходящего по соленоиду, от времени. Определите максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции в соленоиде, если его индуктивность $L = 40 \text{ мГн}$.

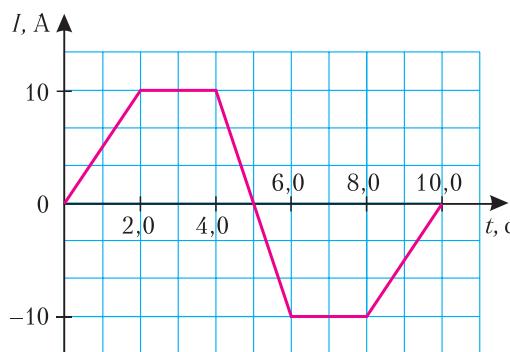


Рис. 186

Дано:

$$L = 40 \text{ мГн} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн}$$

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = ?$$

Решение. ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Анализируя график (рис. 186), можно сделать вывод, что сила тока, проходящего по соленоиду, изменяется на трёх участках:

- 1) от момента времени $t_1 = 0,0 \text{ с}$ до момента времени $t_2 = 2,0 \text{ с}$ сила тока изменяется на $\Delta I_1 = 10 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t_1 = 2,0 \text{ с}$;
- 2) от момента времени $t_3 = 4,0 \text{ с}$ до момента времени $t_4 = 6,0 \text{ с}$ сила тока изменяется на $\Delta I_2 = -20 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t_2 = 2,0 \text{ с}$;
- 3) от момента времени $t_5 = 8,0 \text{ с}$ до момента времени $t_6 = 10,0 \text{ с}$ сила тока изменяется на $\Delta I_3 = 10 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t_3 = 2,0 \text{ с}$.

Поскольку промежутки времени $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3 = 2,0 \text{ с}$, то очевидно, что максимальное значение модуля скорости изменения силы тока, а следовательно, и максимальное значение модуля ЭДС самоиндукции, создаваемой

в соленоиде, соответствует промежутку времени $\Delta t_2 = 2,0$ с (от $t_3 = 4,0$ с до $t_4 = 6,0$ с):

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = L \left| \frac{\Delta I}{\Delta t_2} \right|.$$

Таким образом,

$$|\mathcal{E}_c|_{\max} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Гн} \cdot \frac{|-20 \text{ А}|}{2,0 \text{ с}} = 0,40 \text{ В.}$$

Ответ: $|\mathcal{E}_c|_{\max} = 0,40 \text{ В.}$

Пример 2. На рисунке 187 представлен график зависимости ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке с индуктивностью $L = 2,0 \text{ мГн}$, от времени. Определите изменения силы тока на участках I, II и III графика. Чему равна энергия магнитного поля в момент времени $t = 4,0$ с, если в начальный момент времени сила тока в катушке $I = 0$?

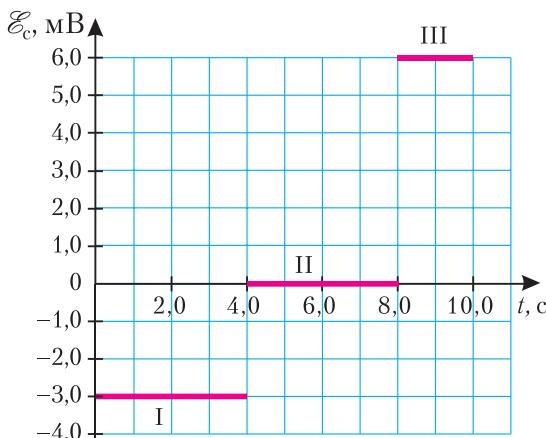


Рис. 187

Дано:

$$L = 2,0 \text{ мГн} =$$

$$= 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$$

$$t = 4,0 \text{ с}$$

$$\Delta I_I = ? \quad \Delta I_{II} = ?$$

$$\Delta I_{III} = ? \quad W_M = ?$$

Решение. Анализируя график, можно сделать вывод, что на участке I ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_{cl} = -3,0 \text{ мВ}$, на участке III — $\mathcal{E}_{cIII} = 6,0 \text{ мВ}$. Изменение силы тока на этих участках графика можно определить, воспользовавшись законом электромагнитной индукции для явления самоиндукции:

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}; \quad \Delta I = -\frac{\mathcal{E}_c \Delta t}{L}.$$

$$\Delta I_I = -\frac{-3,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 4,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = 6,0 \text{ А}; \quad \Delta I_{III} = -\frac{6,0 \cdot 10^{-3} \text{ В} \cdot 2,0 \text{ с}}{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}} = -6,0 \text{ А}.$$

На участке II графика $\mathcal{E}_{cII} = 0$, следовательно, сила тока не изменялась: $\Delta I_{II} = 0$.

В момент времени $t = 4,0$ с энергия магнитного поля катушки $W_m = \frac{LI^2}{2}$.

Следовательно, $W_m = \frac{2,0 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \cdot (6,0 \text{ А})^2}{2} = 36 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 36 \text{ мДж}$.

Ответ: $\Delta I_I = 6,0 \text{ А}; \Delta I_{II} = 0; \Delta I_{III} = -6,0 \text{ А}; W_m = 36 \text{ мДж}$.



Упражнение 24

1. Сила тока, проходящего по замкнутому проводящему контуру, $I = 1,2 \text{ А}$. Магнитное поле этого тока создаёт магнитный поток $\Phi = 3,0 \text{ мВб}$ через поверхность, ограниченную контуром. Определите индуктивность контура.

2. При равномерном изменении силы тока в катушке на $\Delta I = -4,0 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t = 0,10 \text{ с}$ в ней возникает ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = 20 \text{ В}$. Определите индуктивность катушки.

3. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке, индуктивность которой $L = 1,2 \text{ Гн}$, при равномерном изменении силы тока от $I_1 = 2,0 \text{ А}$ до $I_2 = 6,0 \text{ А}$ за промежуток времени $\Delta t = 0,60 \text{ с}$. Определите приращение энергии магнитного поля при заданном изменении силы тока.

4. На рисунке 188 представлен график зависимости силы тока в катушке, индуктивность которой $L = 10 \text{ мГн}$, от времени. Определите ЭДС самоиндукции через промежутки времени $t_1 = 10 \text{ с}$ и $t_2 = 20 \text{ с}$ от момента начала отсчёта времени.

5. Сила тока в катушке равномерно уменьшилась от $I_1 = 10 \text{ А}$ до $I_2 = 5,0 \text{ А}$. При этом энергия магнитного поля изменилась на $\Delta W_m = -3,0 \text{ Дж}$. Определите индуктивность катушки и первоначальное значение энергии магнитного поля.

6. Определите ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке, индуктивность которой $L = 0,12 \text{ Гн}$, при равномерном уменьшении силы тока от $I_1 = 8,0 \text{ А}$, если за промежуток времени $t_1 = 0,20 \text{ с}$ энергия магнитного поля уменьшилась в $\alpha = 2,0$ раза.

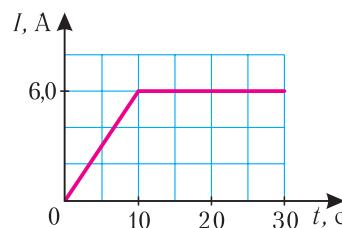


Рис. 188



§ 33-1

§ 33-2

Обобщение и систематизация знаний

МАГНИТНОЕ

Магнитное поле тока

Модуль индукции магнитного поля

$$B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$$

Принцип суперпозиции магнитных полей

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

Направление индукции магнитного поля \vec{B} :

- правило буравчика;
- правило правой руки;
- правило часовой стрелки

Сила, которой однородное магнитное поле действует

На прямолинейный участок проводника с током.

$$\text{Модуль: } F_A = B I \Delta l \sin \alpha$$

Направление: правило левой руки: если левую руку расположить так, чтобы перпендикулярная к проводнику составляющая индукции магнитного поля входила в ладонь, четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец укажет направление силы Ампера, действующей на прямолинейный участок проводника с током

На движущуюся заряженную частицу.

$$\text{Модуль: } F_L = |q|vB \sin \alpha$$

Направление: правило левой руки: если левую руку расположить так, чтобы составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная скорости движения заряда, входила в ладонь, а четыре пальца были направлены по движению положительного заряда (против движения отрицательного), то отогнутый на 90° в плоскости ладони большой палец укажет направление действующей на заряд силы Лоренца

ПОЛЕ**Электромагнитная индукция**

Магнитный поток

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Коэффициент самоиндукции
(индуктивность)

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

Закон электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Сила индукционного тока

$$I_{\text{инд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}}{R}$$

ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Направление
индукционного тока:
правило Ленца

Энергия магнитного поля контура с током

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$



Задания для самоконтроля

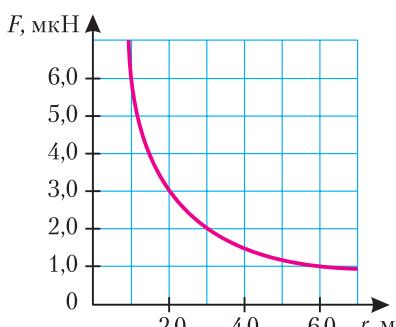


Рис. 189

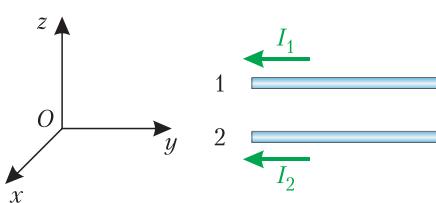


Рис. 190

- 2) противоположно положительному направлению оси z ;
- 3) совпадает с положительным направлением оси y ;
- 4) противоположно положительному направлению оси y ;
- 5) совпадает с положительным направлением оси x .

3. При перемещении прямолинейного участка проводника на расстояние $s = 17$ см перпендикулярно линиям индукции однородного магнитного поля внешней силой совершена работа $A = 38$ мДж. Модуль индукции однородного магнитного поля $B = 0,56$ Тл, а сила тока в проводнике $I = 4,0$ А. Определите

длину участка проводника, если силу тока в нём и скорость его движения поддерживали постоянной.

4. Маленький положительно заряженный шарик, подвешенный на лёгкой нерастяжимой непроводящей нити, движется по окружности в горизонтальной плоскости (рис. 191) в однородном

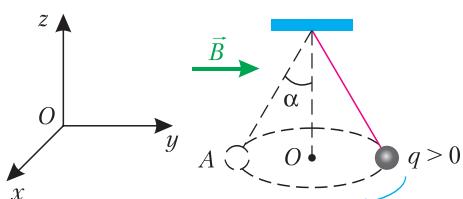


Рис. 191

магнитном поле. Как направлена сила Лоренца, действующая на шарик в момент прохождения им точки A :

- 1) совпадает с положительным направлением оси z ;
- 2) направлена противоположно положительному направлению оси z ;
- 3) совпадает с положительным направлением оси y ;
- 4) направлена противоположно положительному направлению оси y ;
- 5) совпадает с положительным направлением оси x ?

5. Две частицы, массы которых m_1 и $m_2 = \frac{m_1}{16}$, движутся в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Кинетические энергии частиц одинаковые, а соотношение между радиусами траекторий, описываемых частицами, $R_2 = 2R_1$. Определите отношение модулей зарядов частиц.

6. Протон влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите, через какой промежуток времени направление скорости движения протона изменится на угол $\alpha = 90^\circ$, если модуль магнитной индукции поля $B = 0,50$ мТл. Масса протона $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг.

7. Ось соленоида составляет с индукцией однородного магнитного поля угол $\alpha = 30^\circ$. Площадь поверхности, ограниченной каждым из $N = 100$ витков соленоида, $S_1 = 12$ см². Определите ЭДС индукции, которая возникает в соленоиде, если модуль индукции магнитного поля равномерно изменяется со скоростью $\frac{\Delta B}{\Delta t} = 18 \frac{\text{Тл}}{\text{с}}$.

8. На рисунке 192 представлен график зависимости модуля индукции однородного магнитного поля от времени. Определите максимальное значение ЭДС индукции, возникающей в витке, если линии индукции магнитного поля перпендикулярны плоскости витка и площадь поверхности, ограниченной витком, $S = 24$ см².

9. Магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, изготовленным из проводника, изменяется с течением времени по закону $\Phi = A - Ct$, где $A = 2,5$ Вб, $C = 0,20 \frac{\text{Вб}}{\text{с}}$. Определите силу индукционного тока в контуре, если его сопротивление $R = 5,0$ Ом.

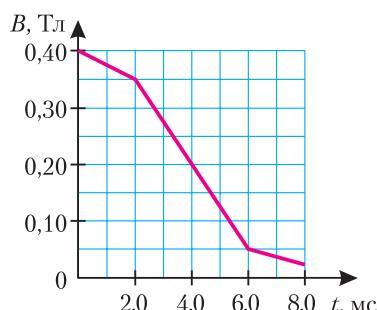


Рис. 192

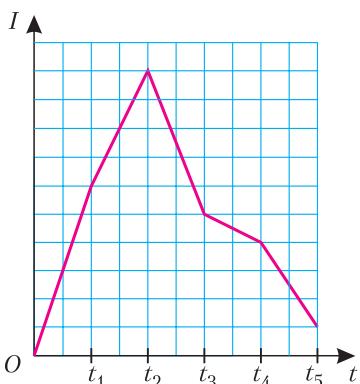


Рис. 193



12. В течение промежутка времени $\Delta t = 10$ мс сила тока в катушке индуктивности равномерно возрастала от $I_1 = 2,0$ А до $I_2 = 6,0$ А. При этом в катушке возникала ЭДС самоиндукции $\mathcal{E}_c = -20$ В. Определите собственный магнитный поток в конце процесса нарастания силы тока.

10. На рисунке 193 представлен график зависимости силы тока, проходящего по замкнутому проводящему контуру с постоянной индуктивностью, от времени. Укажите интервал времени, в пределах которого значение модуля ЭДС самоиндукции $|\mathcal{E}_c|$ минимально.

11. Сила тока в контуре с постоянным коэффициентом самоиндукции изменяется с течением времени по закону $I = C + Dt$, где $C = 5,0$ А, $D = -1,0 \frac{\text{А}}{\text{с}}$. Определите магнитный поток в конце четвёртой секунды, если в момент начала отсчёта времени магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, $\Phi_0 = 85$ мВб.

ГЛАВА 6

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, найдём ответы на следующие вопросы: какие частицы являются носителями электрического заряда в данной среде? Как зависит электрическая проводимость среды от температуры, излучения и других воздействий? Каково техническое применение электрического тока в различных средах?

§ 34. Электрический ток в металлах. Сверхпроводимость

Типичными представителями класса проводников являются металлы. Какова природа электрического тока в металлах?

Природа электрического тока в металлах. В металлических проводниках носители электрического заряда — свободные электроны. Под действием внешнего электрического поля свободные электроны упорядоченно движутся, создавая электрический ток (рис. 194). Электронная проводимость металлов была впервые экспериментально подтверждена немецким физиком К. Рикке (1845–1915) в 1901 г. Суть опыта Рикке заключалась в следующем: по проводнику, состоявшему из трёх отполированных и плотно прижатых друг к другу цилиндров — двух медных

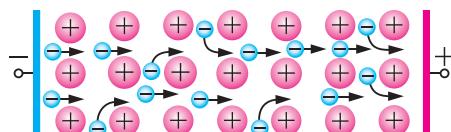


Рис. 194

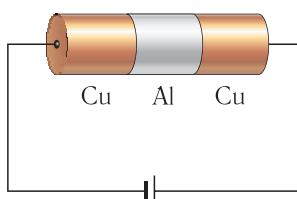


Рис. 195

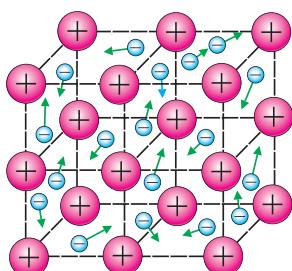


Рис. 196



и одного алюминиевого (рис. 195), в течение года проходил ток одного и того же направления. За этот промежуток времени 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 одинаковыми для всех металлов, т. е. электронами.

Вещества, обладающие электронной проводимостью, называют *проводниками первого рода*.

В соответствии с классической электронной теорией проводимости металлов, созданной немецким физиком П. Друде (1863–1906) в 1900 г., металлический проводник можно рассматривать как физическую систему, состоящую из свободных электронов и положительно заряженных ионов, колеблющихся около положений равновесия (рис. 196).

Из истории физики

Убедительное доказательство электронной природы тока в металлах было получено в опытах с проявлением инерции электронов. Идея таких опытов и первые результаты (1913 г.) принадлежали русским физикам Л. И. Мандельштаму (1879–1944) и Н. Д. Папалекси (1880–1947).

В 1916 г. американские учёные Р. Толмен (1881–1948) и Т. Стюарт (1890–1958) усовершенствовали методику этих опытов и выполнили количественные измерения, неопровергнуто доказавшие, что ток в металлических проводниках обусловлен движением свободных электронов.

Зависимость сопротивления металлов от температуры. При изучении физики в 8-м классе вы узнали, что сопротивление металлических проводников зависит от рода вещества (удельного сопротивления ρ) и их геометрических размеров (длины l и площади поперечного сечения S):

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

А зависит ли сопротивление от температуры проводника?

Проведём опыт. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, проволочной спиралей и гальванометра (рис. 197). Из опыта следует, что при нагревании спиралей показания гальванометра уменьшаются. Вывод очевиден: при увеличении температуры сопротивление металлов увеличивается.

Зависимость сопротивления металлов от температуры используют в специальных приборах — термометрах сопротивления (рис. 198).

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. 199). Платиновые термометры сопротивления применяют для измерения температуры в пределах от -263 до 1064 $^{\circ}\text{C}$, медные — от -50 до 180 $^{\circ}\text{C}$.

Сверхпроводимость. При очень низких температурах сопротивление некоторых металлических проводников резко (скачком) уменьшается до нуля. Впервые это обнаружил в 1911 г. нидерландский физик Г. Камерлинг-ОНнес (1853–1926). Он экспериментально установил, что при температуре $T \leq 4,12$ 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 уменьшается до нуля, называют *критической температурой*. 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.

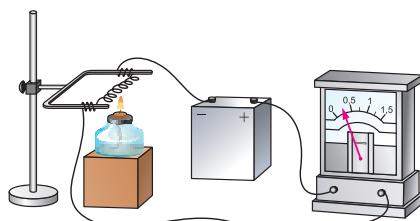


Рис. 197



Рис. 198



Рис. 199

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 магнитных полей в мощных электрических двигателях, генераторах, ускорителях и др. Разрабатывают проекты сверхпроводящих электронно-вычислительных машин. Уже созданы компактные интегральные схемы на сверхпроводниках, обладающие рядом преимуществ по сравнению с имеющимися аналогами.



Электрический ток в металлах представляет собой упорядоченное движение свободных электронов

Металлический проводник можно рассматривать как физическую систему, состоящую из свободных электронов и положительно заряженных ионов

Состояние, при котором электрическое сопротивление проводника уменьшается до нуля, 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. Как изменяется сопротивление металлического проводника при повышении температуры?
4. На каком свойстве проводников основано действие термометра сопротивления?
5. В чём проявляется явление сверхпроводимости?



§ 35. Электрический ток в электролитах

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, прохождение электрического тока в которых всегда сопровождается химическими изменениями и переносом вещества. Какова природа электрического тока в таких проводниках?

Природа электрического тока в электролитах. Из опытов следует, что растворы многих солей, кислот и щелочей, а также расплавы солей и оксидов металлов проводят электрический ток, т. е. являются проводниками. Такие проводники назвали **электролитами**.

Электролиты — вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток.

Проведём опыт. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, лампы накаливания и ванны с дистиллированной водой, в которой находятся два угольных электрода. При замыкании цепи лампа не светится, следовательно, дистиллированная вода не проводит электрический ток. Повторим опыт, добавив в дистиллированную воду сахар. Лампа не светится и в этом случае. Раствор сахара в воде также не является проводником. А теперь добавим в дистиллированную воду небольшое количество соли, например, хлорида меди(II) CuCl_2 . В цепи проходит электрический ток, о чём наглядно свидетельствует свечение лампы (рис. 200). 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 беспорядочно. Под действием внешнего электрического поля на беспорядочное движение ионов накладывается их направленное движение (рис. 201). При этом положительно заряженные ионы Cu^{2+} движутся к катоду (электроду, подключённому к отрицательному полюсу источника тока), отрицательно заряженные ионы Cl^- — к аноду (электроду, подключённому к положительному полюсу источника тока). На аноде будет происходить процесс окисления ионов Cl^- до атомов. Атомы образуют молекулы хлора, которые выделяются на аноде. На катоде будет происходить процесс восстановления ионов Cu^{2+} до атомов и осаждение меди. Это явление называют **электролизом**.

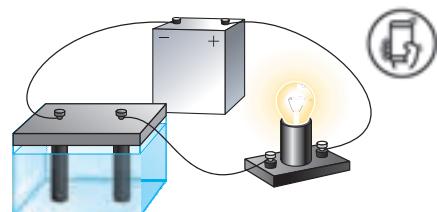


Рис. 200

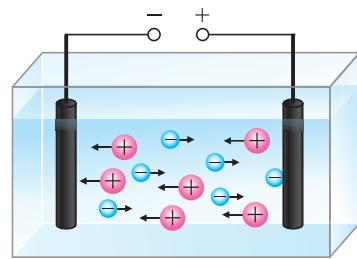


Рис. 201

Электролиз — процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов.

Таким образом, свободные носители электрического заряда в электролитах — положительно и отрицательно заряженные ионы, которые образуются в результате электролитической диссоциации, а проводимость электролитов является ионной. Электролиты относят к *проводникам второго рода*.

От теории к практике

Почему опасно прикасаться голыми руками к неизолированным металлическим проводам, по которым проходит электрический ток?



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 малоокисляющимися металлами (хромом, никелем). Предмет, подлежащий гальваническому покрытию, например, ложку (рис. 202), погружают в качестве катода в электролитическую ванну. Электролитом является раствор соли металла, которым осуществляется покрытие. Анодом служит пластина из такого 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 необходимо поместить между двумя или более 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 пластиичного материала (например, воска). Для придания слепку электропроводности его покрывают графитовой пылью, погружают в электролитическую ванну в качестве катода и получают на нём слой металла нужной толщины. Затем, нагревая, удаляют воск.

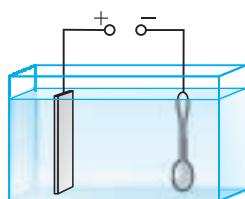


Рис. 202

Правообладатель Адукацыя і выхаванне

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. Например, пластину из неочищенной меди помещают в качестве анода в ванну с раствором медного купороса, где катодом служит лист чистой меди (рис. 203). 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.

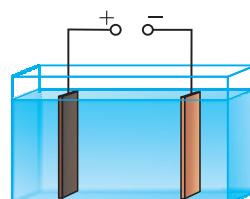


Рис. 203



Электролиты — вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток

Электрический ток в электролитах представляет собой упорядоченное движение ионов, которые образуются в результате электролитической диссоциации растворённого вещества

Электролиз — процесс выделения на электроде вещества, связанный с окислительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов



1. Что называют электролитом?
2. Какова природа электрического тока в электролитах?
3. Какой процесс называют электролизом?
4. Приведите примеры использования электролиза.



§ 36. Электрический ток в газах. 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. При каких условиях это возможно?

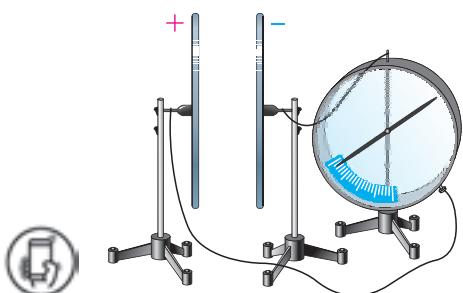


Рис. 204

Природа электрического тока в газах.

Проведём опыт и убедимся, что электрическая проводимость газа (воздуха) может изменяться. Два металлических диска, заряженных разноимёнными зарядами и расположенных на некотором расстоянии друг от друга, соединим с электрометром (рис. 204). 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. 205).

Вывод очевиден: в воздушном промежутке между дисками появились свободные носители электрического заряда.

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, т. е. к *ионизации газа*.

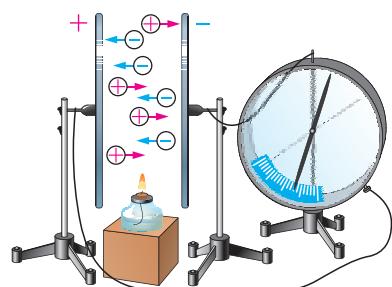


Рис. 205

Для отрыва электрона от атома (молекулы) необходима энергия, минимальное значение которой 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 (катоду) и направленное движение электронов и отрицательно заряженных ионов к положительному электроду (аноду). В ионизированном газе возникает электрический ток, который называют *газовым разрядом*.

Таким образом, носители электрического заряда в ионизированных газах — положительно и отрицательно заряженные ионы и свободные электроны, а проводимость газов является ионно-электронной.

Если устранить внешнее воздействие (в данном случае нагревание пламенем), электрический ток в газе прекращается. Это обусловлено тем, что при столкновении положительно заряженного иона с электроном они образуют нейтральный атом (молекулу) газа. Ионы противоположных знаков при столкновении также превращаются в нейтральные атомы (молекулы) — рекомбинируют. При рекомбинации освобождается энергия, равная энергии, затраченной на ионизацию.

Таким образом, 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 ионизатора, называют *несамостоятельным*.

Однако в ряде случаев газовый разряд может существовать и после прекращения действия ионизатора. В этом случае имеющееся между электродами сильное электрическое поле является причиной сохранения газового разряда, который называют *самостоятельным*.

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 (десяти доли миллиметра ртутного столба). Тлеющий разряд широко используют в различных газосветных трубках (рис. 206), применяемых для световой

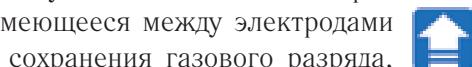


Рис. 206



Рис. 207



Рис. 208



Рис. 209



Рис. 210

рекламы и декораций, лампах дневного света (рис. 207), неоновых лампах.

Дуговой разряд представляет собой столб ярко светящегося газа (рис. 208). 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. 209), электролиза расплавов, в промышленных электропечах для плавки стали и др.

Интересно знать

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, и характерным по-трескиванием (рис. 210).

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.

Интересно знать

Часто перед грозой, во время шторма или снежной бури в атмосфере резко возрастает напряжённость электрического поля. Это приводит к возникновению слабого свечения вблизи заострённых предметов, например, вблизи корабельных мачт, шпилей на зданиях и др. (рис. 211). Моряки, бороздившие моря и океаны, часто наблюдали это явление (коронный разряд), которое получило название «огни Святого Эльма». Один из участников кругосветного плавания Магеллана писал: «Во время тех штормов нам много раз являлся сам Святой Эльм в виде света... чрезвычайно тёмными ночами на грат-мачте, где оставался в течение двух и более часов, избавляя нас от уныния».



Рис. 211

Искровой разряд наблюдают при высоком напряжении (рис. 212). Он сопровождается ярким свечением газа, звуковым эффектом, который создаётся резким повышением давления воздуха. Примером искрового разряда в природе служит молния (рис. 213).



Рис. 212



Рис. 213

Интересно знать

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 — $d \sim 10\text{--}20$ 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 высокой температуре любое вещество испаряется, превращаясь в газ. При дальнейшем увеличении температуры усиливается термическая ионизация. Нейтральные молекулы газа распадаются на составляющие их атомы, которые в дальнейшем превращаются в ионы. Кроме того, ионизация газа может быть обусловлена его взаимодействием с электромагнитным излучением (фотоионизация) или бомбардировкой газа заряженными частицами, например, ионизация электронным ударом.

Плазма — полностью или частично ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. средние плотности положительных ρ_+ и отрицательных ρ_- зарядов одинаковы по модулю: $\rho_+ = |\rho_-|$.

В зависимости от степени ионизации различают частично ионизованную и полностью ионизованную плазму. В зависимости от скорости теплового движения заряженных частиц различают низкотемпературную ($< 10^5$ К) и высокотемпературную ($> 10^6$ К) плазму. Примером низкотемпературной плазмы является плазма, образующаяся при всех видах электрического разряда в газах.

Звёзды представляют собой гигантские сгустки высокотемпературной плазмы.

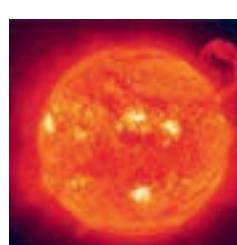


Рис. 214

Плазма заполняет космическое пространство между звёздами и галактиками и является самым распространённым состоянием вещества во Вселенной (рис. 214). Концентрация плазмы в межгалактическом пространстве очень мала, в среднем одна частица на кубический метр. Верхний слой атмосферы Земли также представляет собой слабо ионизованную плазму. Причиной ионизации являются ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца и других звёзд, быстрые заряженные частицы и др.

Независимо от способа получения плазма в целом является электрически нейтральной. Проводимость плазмы растёт с увеличением отношения числа ионизованных атомов (молекул) к их общему числу. Полностью ионизованная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.



Носителями электрического заряда в ионизованных газах являются положительно и отрицательно заряженные ионы и свободные электроны

Газовый разряд — прохождение электрического тока через ионизованный газ

Плазма — полностью или частично ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. средние плотности положительных ρ_+ и отрицательных ρ_- зарядов одинаковы по модулю: $\rho_+ = |\rho_-|$



1. Какова природа электрического тока в газах?
2. Как можно увеличить электрическую проводимость газов?
3. Какой разряд называют несамостоятельным?
4. Какой разряд называют самостоятельным?
5. Какие виды самостоятельного разряда вы знаете? Приведите примеры их использования.
6. Что такое плазма? Как её можно получить?



§ 37. Электрический ток в полупроводниках. Собственная и примесная проводимости полупроводников

Полупроводники — широкий класс как неорганических, так и органических веществ в твёрдом или жидком состоянии. Полупроводники обладают многими замечательными свойствами, благодаря которым они нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Каковы особенности строения полупроводников?

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещённости. Удельное сопротивление полупроводников находится в пределах от 10^{-6} до 10^8 Ом · м (при $T = 300$ К), т. е. во много раз меньше, чем у диэлектриков, но существенно больше, чем у металлов. В отличие от проводников удельное сопротивление полупроводников резко 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, сурьма, сера, селен, теллур и др.), множество оксидов и сульфидов металлов, а также других химических соединений.

Изучить свойства полупроводников можно на опытах. Соберём электрическую цепь, состоящую из источника тока, полупроводника и миллиамперметра (рис. 215). Из опыта следует, что

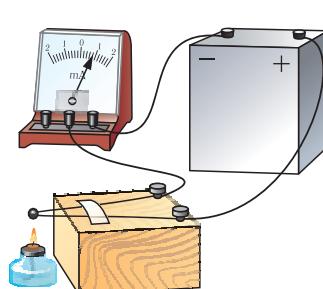


Рис. 215

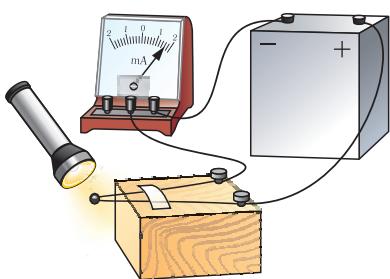


Рис. 216

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), которые образуют электронную пару. Поэтому все валентные электроны атома германия участвуют в образовании ковалентных связей. На рисунке 217 изображена плоская схема пространственной решётки кристалла германия.

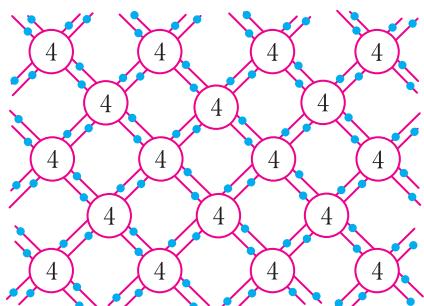


Рис. 217

При нагревании полупроводника сила тока в цепи возрастает. Возрастание силы тока обусловлено тем, что при увеличении температуры сопротивление полупроводника уменьшается.

Проведём ещё один опыт. Изменяя освещённость поверхности полупроводника, наблюдаем изменение показаний миллиамперметра (рис. 216). Результаты наблюдений означают, что при освещении поверхности полупроводника его сопротивление уменьшается.

Для того чтобы разорвать ковалентную связь и сделать электрон свободным, кристаллу герmania 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. 218).

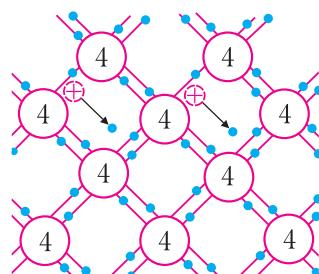


Рис. 218



Интересно знать

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.

Дырки считают подвижными носителями положительного заряда, который равен модулю заряда электрона.

При наличии внешнего электрического поля на беспорядочное 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. 219).

Проводимость, обусловленную движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике, называют *собственной проводимостью* полупроводника.

Примесная проводимость полупроводников. Изменить свойства полупроводников можно не только нагреванием или воздействием электромагнитного

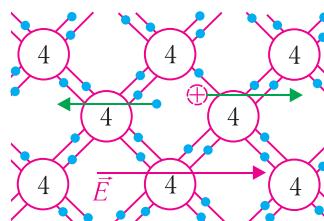


Рис. 219



излучения, но и добавлением в чистый полупроводник примесей. Тогда в полупроводнике наряду с собственной проводимостью возникает примесная проводимость.

Проводимость, обусловленную наличием примесей в полупроводнике, называют *примесной проводимостью* полупроводника.

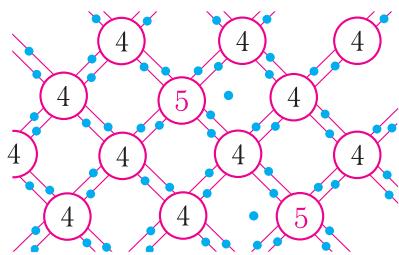


Рис. 220

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. 220). Пятым электроном 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).

Теперь рассмотрим механизм примесной проводимости полупроводника на примере кристалла германия Ge, содержащего примесь атомов индия In, валентность которых равна трём.

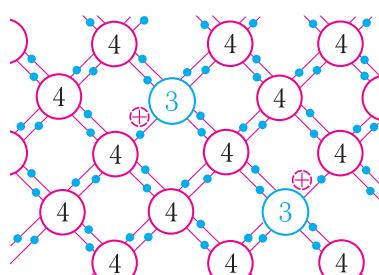


Рис. 221

Валентные электроны атома индия образуют ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами германия (рис. 221). 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.

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).



От теории к практике

Какой проводимостью будет обладать германий при введении в него небольшого количества фосфора? галлия? сурьмы?



Техническое применение полупроводников. Приборы, работа которых основана на свойстве полупроводников изменять своё сопротивление при изменении температуры, называют *термисторами* или *терморезисторами*.

Терморезисторы (рис. 222) используют для защиты телефонных станций и линий от токовых перегрузок, для пускозащитных реле компрессоров холодильников, поджига люминесцентных ламп, подогрева дизельного топлива; в различных электронагревательных устройствах: нагревательных решётках тепловентиляторов, сушилках для обуви.

Приборы, работа которых основана на свойстве полупроводников изменять своё сопротивление при изменении освещённости их поверхности, называют *фоторезисторами* или *фотосопротивлениями* (рис. 223). 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.

Широкое применение находят полупроводниковые диоды, которые являются основными элементами выпрямителей переменного тока и



Рис. 222



Рис. 223

детекторов электромагнитных сигналов. С помощью полупроводниковых диодов можно осуществить непосредственное превращение энергии электромагнитного излучения в электрическую энергию. Такие диоды называют фотодиодами (рис. 224).

В электрических устройствах (схемах) используют транзистор — прибор, предназначенный для усиления, генерации, преобразования и коммутации сигналов в электрических цепях.

Светоизлучающий диод (светодиод) — это полупроводниковый прибор, преобразующий электрическую энергию непосредственно в световое излучение. Он представляет собой миниатюрный полупроводниковый диод, помещённый в прозрачный корпус (рис. 225). Используя светодиоды, изготавливают, например, светодиодные светильники (рис. 226).

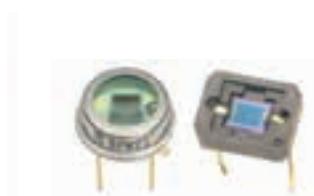


Рис. 224



Рис. 225



Рис. 226

От теории к практике

1. Для сортировки и счёта деталей широко применяют фотодиоды. Каким свойством полупроводников можно объяснить действие этого прибора?

2. На рисунке 227 представлены графики зависимости силы тока от напряжения для терморезистора. Какой из графиков соответствует более низкой температуре терморезистора? Определите сопротивление терморезистора при более высокой температуре.

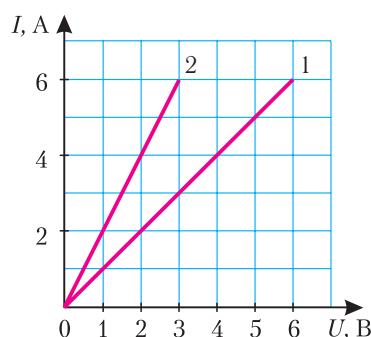


Рис. 227

Из истории физики

В 2000 г. уроженцу Беларуси Жоресу Ивановичу Алфёрову (1930–2019) совместно с американскими учёными Гербертом Кремером и Джеком Килби была присуждена Нобелевская премия по физике за «исследование полупроводниковых гетероструктур, лазерных диодов и сверхбыстрых транзисторов».



Электрический ток в полупроводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов и дырок

Проводимость полупроводника

Собственная: обусловлена движением свободных электронов и дырок в чистом полупроводнике

Примесная: обусловлена наличием примесей в полупроводнике

Примеси поставляют свободные электроны без возникновения равного им количества дырок (электронные полупроводники или полупроводники n -типа)

Примеси приводят к образованию дырок без увеличения числа свободных электронов (дырочные полупроводники или полупроводники p -типа)



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?
5. Что называют примесной проводимостью полупроводников?
6. При каком условии в примесном полупроводнике возникает электронная проводимость? Приведите примеры.
7. При каком условии в примесном полупроводнике возникает дырочная проводимость? Приведите примеры.
8. Приведите примеры использования полупроводниковых приборов.



§ 37-1

Обобщение и систематизация знаний**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ**

	Носители электрического заряда	Образование носителей заряда	Применение
Металлы	Электроны	Взаимодействие электронов, находящихся на внешних оболочках атомов, не только с ядрами своих атомов, но и с ядрами соседних атомов	Термометры сопротивления, линии передачи электрической энергии, обмотка электромагнита в электрических двигателях, генераторах, ускорителях и др., интегральные схемы
Электролиты	Положительно и отрицательно заряженные ионы	Распад молекул электролита в расплаве или водном растворе на ионы (электролитическая диссоциация)	Гальваностегия, гальванопластика, получение металлов из расплавленных руд и их очистка, электрохимическая обработка металлов
Газы	Положительно и отрицательно заряженные ионы, электроны	Потеря атомами (молекулами) электронов в результате нагревания, облучения и присоединение некоторых образовавшихся при отрыве электронов к первоначально нейтральным атомам (молекулам) газа	Газосветные трубы, лампы дневного света, неоновые лампы, сварка и резка металлов, электролиз расплавов, плавка стали в промышленных электропечах, электрофильтры
Полупроводники	Электроны, дырки	Разрыв ковалентных связей между атомами в результате нагревания, облучения, воздействия внешних электрических и магнитных полей	Фоторезисторы, терморезисторы, диоды, транзисторы, фотодиоды, светодиоды

Темы проектных заданий по разделу «Электродинамика»

1. Природа статического электричества и его применение.
2. Роль статического электричества в живой природе.
3. Статическое электричество в нашей жизни. Защита от статического электричества.
4. Виды конденсаторов и их применение.
5. Использование человеком электрической энергии и эффективные способы её сбережения.
6. Лечебное применение электрического тока в медицине.
7. Природа молний. Опасность и защита.
8. От лампочки Эдисона к светодиодной лампе.
9. Источники электрического тока в жизни человека.
10. Влияние магнитного поля Земли на жизнь и здоровье человека.
11. Действие электромагнитных полей на живые организмы.
12. Электромагнит: принцип действия и применение.

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).

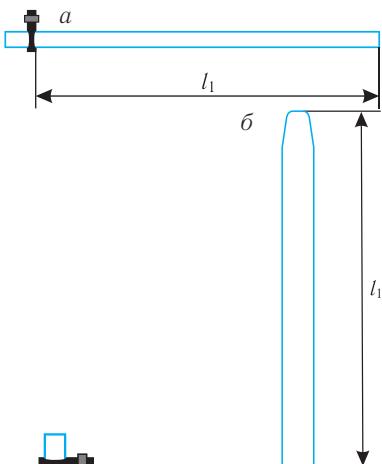


Рис. 228

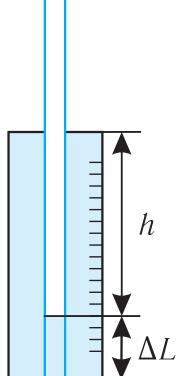


Рис. 229

Вывод расчётной формулы

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 $p_1V_1 = p_2V_2$.

Исследуемым газом в выполняемой работе является воздух, находящийся внутри прозрачной силиконовой трубки с зажимом или пробкой на конце (стеклянной трубки) (рис. 228, а, б).

Поскольку внутренняя полость трубы имеет форму цилиндра и площадь S её поперечного сечения одинакова по всей длине трубы, 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, $p_1Sl_1 = p_2Sl_2$ или $\frac{p_2}{p_1} = \frac{l_1}{l_2}$.

При выполнении работы проверяют справедливость этого равенства.

Порядок выполнения работы

- Закройте зажим на конце силиконовой трубы. Измерьте: длину l_1 столба воздуха в трубке и давление p_1 воздуха (используя барометр-анероид) в начальном состоянии.

- Поставьте мензурку на поддон и заполните её водой комнатной температуры так, чтобы при погружении трубы в мензурку поднялась до её верхнего края. Погрузите в воду трубку так, чтобы её открытый конец оказался у дна мензурки (рис. 229).

Наблюдайте за поступлением воды в трубку. Когда оно прекратится, измерьте длину ΔL столба воды, вошедшей в трубку.

3. Измерьте разность уровней h воды в мензурке и трубке и вычислите длину l_2 столба воздуха в трубке в конечном состоянии: $l_2 = l_1 - \Delta L$.

4. Вычислите давление $p_{\text{в}}$ столба воды: $p_{\text{в}} = \rho gh$ и давление p_2 воздуха в трубке в конечном состоянии: $p_2 = p_1 + p_{\text{в}}$.

Примите плотность воды $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, значение ускорения свободного падения $g = 9,810 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$.

5. Вычислите отношения $\frac{p_2}{p_1}$ и $\frac{l_1}{l_2}$. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу в тетради.

$l_1, \text{ м}$	$p_1, \text{ Па}$	$\Delta L, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$p_{\text{в}}, \text{ Па}$	$p_2, \text{ Па}$	$\frac{p_2}{p_1}$	$\frac{l_1}{l_2}$

6. Вычислите относительную погрешность ε_1 и абсолютную погрешность Δ_1 измерения отношения $\frac{p_2}{p_1}$: $\varepsilon_1 = \frac{\Delta p}{p_1} + \frac{\Delta p}{p_2}$, где $\Delta p = \Delta_{\text{и}} p + \Delta_{\text{o}} p$ ($\Delta_{\text{и}}$ — абсолютная инструментальная погрешность прибора; Δ_{o} — абсолютная погрешность отсчёта (см. приложение)); $\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{p_2}{p_1}$.

7. Вычислите относительную погрешность ε_2 и абсолютную погрешность Δ_2 измерения отношения $\frac{l_1}{l_2}$: $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}$, где $\Delta l = \Delta_{\text{и}} l + \Delta_{\text{o}} l$; $\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}$.

8. Запишите результаты измерений в виде двойных неравенств:

$$\frac{p_2}{p_1} - \Delta_1 < \frac{p_2}{p_1} < \frac{p_2}{p_1} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

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

- При каких условиях для определения параметров состояния газа можно использовать уравнение $pV = \text{const}$?
- Почему при выполнении данной работы процесс изменения объёма воздуха можно считать практически изотермическим?
- 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 °C; 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 трубы с зажимами (пробками) на концах.

Поскольку внутренняя полость трубы имеет форму цилиндра и площадь S её поперечного сечения одинакова по всей длине трубы, то $V_1 = Sl_1$ и $V_2 = Sl_2$, где l_1 и l_2 — длины столба воздуха в трубке в начальном (рис. 230, а) и конечном (рис. 230, б) состояниях соответственно.

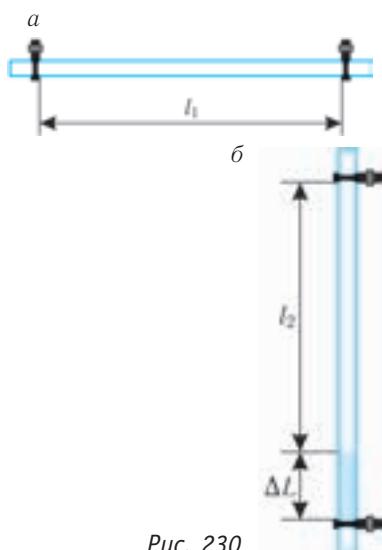


Рис. 230

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

- Измерьте длину l_1 столба воздуха в трубке в начальном состоянии (см. рис. 230, *a*). Трубку плотно уложите внутри стакана калориметра, предварительно закрыв зажим, который располагается вблизи дна. Верхний зажим оставьте открытым.

- Заполните стакан калориметра водой, предварительно нагретой до температуры 55–60 °C, так, чтобы конец трубки с верхним зажимом оказался погруженным в воду не более чем на 5–10 мм. 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.

- Закройте верхний зажим, слейте нагретую воду и заполните стакан водой комнатной температуры до прежнего уровня (конец трубки с верхним зажимом должен быть погруженным в воду не более чем на 5–10 мм). Откройте верхний зажим. Через 1–2 минуты после установления теплового равновесия определите по показанию термометра температуру T_2 воздуха, находящегося в трубке.

- 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. 230, *б*).

- Вычислите длину l_2 столба воздуха в трубке после охлаждения: $l_2 = l_1 - \Delta L$.

- Вычислите отношения $\frac{T_1}{T_2}$ и $\frac{l_1}{l_2}$. Сравните полученные результаты и сделайте вывод.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу в тетради.

l_1 , м	T_1 , К	T_2 , К	ΔL , м	l_2 , м	$\frac{T_1}{T_2}$	$\frac{l_1}{l_2}$

- Вычислите относительную погрешность ε_1 и абсолютную погрешность Δ_1 измерения отношения $\frac{T_1}{T_2}$: $\varepsilon_1 = \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{\Delta T}{T_2}$, где $\Delta T = \Delta_u T + \Delta_o T$; $\Delta_1 = \varepsilon_1 \frac{T_1}{T_2}$.

- Вычислите относительную погрешность ε_2 и абсолютную погрешность Δ_2 измерения отношения $\frac{l_1}{l_2}$: $\varepsilon_2 = \frac{\Delta l}{l_1} + \frac{\Delta l}{l_2}$, где $\Delta l = \Delta_u l + \Delta_o l$; $\Delta_2 = \varepsilon_2 \frac{l_1}{l_2}$.

9. Запишите результаты измерений в виде двойных неравенств:

$$\frac{T_1}{T_2} - \Delta_1 < \frac{T_1}{T_2} < \frac{T_1}{T_2} + \Delta_1; \quad \frac{l_1}{l_2} - \Delta_2 < \frac{l_1}{l_2} < \frac{l_1}{l_2} + \Delta_2.$$

Сравните полученные интервалы значений и сделайте вывод.

Контрольные вопросы

- При каких условиях для определения параметров состояния газа можно использовать уравнение $V = \text{const } T$?
- Почему при выполнении данной работы процесс охлаждения воздуха можно считать практически изобарным?
- 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.

Л.р. 3-1

Лабораторная работа 3

Измерение относительной и абсолютной влажности воздуха

Цель: измерить относительную и абсолютную влажность воздуха.

Оборудование: термометр лабораторный; марлевый бинт; сосуд с водой; таблица зависимости давления и плотности насыщенного водяного пара от температуры; психрометрическая таблица.

Вывод расчётной формулы

Одной из характеристик влажности воздуха является относительная влажность. Относительная влажность φ показывает, насколько водяной пар, содержащийся в воздухе при данной температуре, далёк от насыщения. Относительную влажность воздуха можно определить по формуле $\varphi = \frac{\rho_{\text{n}}}{\rho_{\text{h}}} \cdot 100 \%$, где ρ_{n} — абсолютная влажность воздуха; ρ_{h} — плотность насыщенного водяного пара при данной температуре.

Вместе с тем, зная показания сухого и влажного термометров, относительную влажность воздуха φ можно определить, используя психрометрическую таблицу (табл. 1), а плотность насыщенного водяного пара ρ_{h} — таблицу зависимости давления и плотности насыщенного водяного пара от температуры (табл. 2). Тогда абсолютную влажность ρ_{n} воздуха можно определить по формуле $\rho_{\text{n}} = \frac{\varphi \cdot \rho_{\text{h}}}{100 \%}$.

Таблица 1

Показания сухого термометра, °C	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность воздуха, %										
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	75	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	85	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Таблица 2

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{kPa}$	$\rho_{\text{н}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}, \text{kPa}$	$\rho_{\text{н}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$
10	1,23	9,4	21	2,49	18,3
11	1,31	10,0	22	2,64	19,4
12	1,40	10,7	23	2,81	20,5
13	1,50	11,3	24	2,98	21,8
14	1,60	12,1	25	3,17	23,0
15	1,71	12,8	26	3,36	24,4
16	1,82	13,6	27	3,57	25,7
17	1,94	14,4	28	3,78	27,2
18	2,06	15,4	29	4,01	28,8
19	2,20	16,3	30	4,24	30,3
20	2,34	17,3	31	4,49	32,0

Порядок выполнения работы

1. Измерьте температуру t_1 воздуха в кабинете (показание сухого термометра). Оберните резервуар термометра влажным марлевым бинтом. Подождите (примерно 15 мин), пока температура установится, и снимите показания влажного термометра t_2 . Определите разность показаний сухого и влажного термометров $t_1 - t_2$.

2. Используя психрометрическую таблицу, определите относительную влажность φ воздуха в кабинете. Вычислите абсолютную влажность $\rho_{\text{п}}$ воздуха.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу в тетради.

$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_1 - t_2, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$	$\rho_{\text{п}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$

3. Вычислите абсолютную погрешность Δt и относительную погрешность ε_t прямого измерения температуры (для одного из измерений): $\Delta t = \Delta_{\text{и}}t + \Delta_0t$, $\varepsilon_t = \frac{\Delta t}{t}$. Запишите результат измерения температуры в виде: $t = (t \pm \Delta t) ^\circ\text{C}$; $\varepsilon_t = \%$.

4*. Определите относительную влажность воздуха в школьном коридоре (на улице). Сравните значения относительной влажности в кабинете и коридоре (на улице). Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какова относительная влажность воздуха, если показания сухого и влажного термометров одинаковы?

2. Как изменится абсолютная и относительная влажность воздуха в помещении при понижении температуры?

3. Как будет изменяться разность показаний сухого и влажного термометров при понижении температуры воздуха, если его абсолютная влажность остается постоянной?

Суперзадание

Используя результаты, полученные при выполнении данной работы, определите массу воды, которую надо испарить в вашем кабинете, чтобы относительная влажность воздуха повысилась на $\Delta\varphi = 10 \%$.

* Задание выполняется по усмотрению учителя.

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:

$$r = \frac{I_2 R_2 - I_1 R_1}{I_1 - I_2}; \quad \mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}.$$

Порядок выполнения работы

1. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 231. При разомкнутом ключе проверьте надёжность контактных соединений и правильность подключения электроизмерительных приборов.

2. Проведите не менее шести измерений силы тока и напряжения на внешнем участке цепи при различных положениях подвижного контакта реостата. Вычислите внутреннее сопротивление r и ЭДС \mathcal{E} источника постоянного тока для каждой пары результатов измерений.

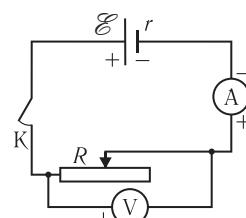


Рис. 231

3. Вычислите средние значения внутреннего сопротивления $\langle r \rangle$ и ЭДС $\langle \mathcal{E} \rangle$ источника тока.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу в тетради.

№ опыта	U , В	I , А	r , Ом	$\langle r \rangle$, Ом	\mathcal{E} , В	$\langle \mathcal{E} \rangle$, В
1						
2						
...						

4. Постройте график зависимости напряжения U на внешнем участке цепи от силы тока I в цепи. 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 $r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\max}}$.

5. При разомкнутом ключе подключите вольтметр к источнику тока и измерьте его ЭДС \mathcal{E} .

6. Сравните результаты вычисления среднего значения ЭДС $\langle \mathcal{E} \rangle$ источника тока (п. 3), определения ЭДС \mathcal{E} по графику (п. 4) и прямых измерений ЭДС \mathcal{E} (п. 5).

7. Вычислите абсолютную погрешность $\Delta \mathcal{E}$ и относительную погрешность $\epsilon_{\mathcal{E}}$ прямых измерений ЭДС источника тока: $\Delta \mathcal{E} = \Delta_u \mathcal{E} + \Delta_o \mathcal{E}$, $\epsilon_{\mathcal{E}} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}}$. Запишите результаты прямых измерений ЭДС источника тока в виде:

$$\mathcal{E} = (\mathcal{E} \pm \Delta \mathcal{E}) \text{ В}; \epsilon_{\mathcal{E}} = \%.$$

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.

*Приложение***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 $\Delta x = \Delta_{\text{и}}x + \Delta_{\text{o}}x$ 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
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
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}

Окончание таблицы 1

Вольтметр школьный	6 В	0,15 В
Термометр лабораторный	100 °C	1 °C
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 $\frac{\Delta y}{y}$
$x_1 + x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{ x_1 + x_2 }$
$x_1 - x_2$	$\Delta x_1 + \Delta x_2$	$\frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{ x_1 - x_2 }$
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 }$
$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \ln x }$
$\sin x$	$ \cos x \Delta x$	$\frac{\Delta x}{ \tg x }$
$\cos x$	$ \sin x \Delta x$	$ \tg x \Delta x$
$\tg x$	$\frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{ \sin 2x }$

Абсолютную погрешность табличных величин и фундаментальных физических постоянных определяют как половину единицы последнего ряда значения величины.

Ответы

Упражнение 1

1. $M(H_2O) = 18 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, m_0(H_2O) = 3,0 \cdot 10^{-23} \text{ г}; M(CO_2) = 44 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, m_0(CO_2) = 7,3 \cdot 10^{-23} \text{ г}; M(NH_3) = 17 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, m_0(NH_3) = 2,8 \cdot 10^{-23} \text{ г}; M(HNO_3) = 63 \frac{\text{г}}{\text{моль}}, m_0(HNO_3) = 1,0 \cdot 10^{-22} \text{ г}.$
2. $v = 11 \text{ моль}, N = 6,6 \cdot 10^{24}.$
3. $m = 2,5 \text{ г}.$
4. $\frac{N_m}{N_a} = 1,4.$
5. $V = 17 \text{ см}^3.$
6. $m_0 = 4,7 \cdot 10^{-25} \text{ кг}, d = 6,4 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$
7. $m = 78 \text{ г}.$

Упражнение 2

1. $n = 2,3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$
2. $p_2 = 28 \text{ кПа}.$
3. $\langle E_k \rangle = 5,6 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$
4. $\langle E_k \rangle = 1,5 \cdot 10^{-22} \text{ Дж}.$
5. $\langle v^2 \rangle = 2,5 \cdot 10^5 \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}.$
6. $\frac{p_2}{p_1} = 6.$

Упражнение 3

1. $T = 220 \text{ К}.$
2. а) $t = 200 \text{ }^{\circ}\text{C};$ б) $t = -153 \text{ }^{\circ}\text{C}.$
3. $\langle E_k \rangle = 6,1 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$
4. $N = 1,0 \cdot 10^{21}.$
5. $p = 1,2 \text{ МПа}.$
6. $\Delta t = 297 \text{ }^{\circ}\text{C}.$
7. $\rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

Упражнение 4

1. $v = 2,10 \cdot 10^{-2} \text{ моль}.$
2. $V = 0,554 \text{ м}^3.$
3. $p_2 = 1,5 \text{ МПа}.$
4. $V_2 = 7,8 \text{ л}.$
5. $\frac{p_1}{p_2} = 7,5.$

Упражнение 5

1. $T_1 = 286 \text{ К}.$
5. Утечки газа не было.

Задания для самоконтроля

1. $\frac{n_2}{n_1} = 2.$
2. $V = 12 \text{ л}.$
3. $V = 3,5 \text{ л}.$
4. $\frac{p_{N_2}}{p_{H_2}} = 14.$
5. $\rho = 0,9 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$
6. $n_{O_2} = 2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}.$
7. $\langle E_k \rangle = 3,0 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$
8. $t_2 = 86,8 \text{ }^{\circ}\text{C}.$
9. $V_2 = 1 \text{ л}.$
10. $\frac{\langle v_{\text{KBII}} \rangle}{\langle v_{\text{KBII}} \rangle} = 1,4.$
11. $p = 4,0 \cdot 10^5 \text{ Па}.$
12. $V = 0,83 \text{ м}^3.$
13. $T_2 = 840 \text{ К}.$
14. $T_3 = 588 \text{ К}.$

Упражнение 6

1. $\varphi = 66\%$. 2. $\varphi = 69\%$. 3. При температуре $t < 10^\circ\text{C}$. 4. $\Delta m = 2,9 \cdot 10^6$ кг. 5. $\varphi = 60\%$, $\rho = 7,3 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$. 6. $t_{\text{в}} = 13^\circ\text{C}$.

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. $N = 1,9 \cdot 10^{20}$.

Упражнение 8

1. Объём газа уменьшается, давление газа увеличивается, внутренняя энергия газа не изменяется. 2. $\Delta V = 0,40$ л. 3. $A = 3,5$ кДж. 4. $m = 0,47$ кг. 5. $A = 5,5$ кДж.

Упражнение 9

1. $m_2 = 1,26$ кг. 2. $m_1 = 1,5$ кг. 3. $t = 80^\circ\text{C}$. 4. $\Delta m = 68$ г. 5. $t_1 = t_2 = 0^\circ\text{C}$. В обоих случаях лёд растаял частично, и в калориметре находилась смесь воды и льда.

Упражнение 10

1. $Q = A = 6,4$ кДж. 2. $A_{12} = 0$, $Q_{12} < 0$, $\Delta U_{12} < 0$. 3. $\Delta U_{12} = -1,35$ кДж.
4. $Q = 358$ кДж. 5. $\Delta U = 75,0$ кДж, $Q = 125$ кДж.

Упражнение 11

1. $\eta_t = 25\%$. 2. $Q_1 = 1,5$ кДж. 3. $\langle P \rangle = 9,8$ кВт. 4. $N = 110$ дней.

Задания для самоконтроля

1. $\frac{U_{\text{Ne}}}{U_{\text{He}}} = 3$. 2. $\Delta U = 0,36$ кДж. 3. $\frac{U_3}{U_1} = 4$. 4. $\Delta U = -3,0$ кДж.
5. $m = 7,49$ г. 6. $A = 1,8 \cdot 10^2$ Дж. 7. $A = 2,5$ кДж. 8. $T_1 = 217$ К. 9. 3 и 4.
10. $\Delta t = 16^\circ\text{C}$. 11. $t_{0\text{л}} = -28^\circ\text{C}$. 12. $m_2 = 1$ кг. 13. $v = 0,29$ моль.
14. $A = 12$ кДж, $Q = 31$ кДж. 15. 1 → 2: $A > 0$, $Q > 0$, $\Delta U > 0$; 2 → 3:
 $A < 0$, $Q < 0$, $\Delta U = 0$; 3 → 1: $A = 0$, $Q < 0$, $\Delta U < 0$.

Упражнение 12

1. Нельзя. 2. $q = -8,0 \cdot 10^{-14}$ Кл. 3. $q_3 = -2e$. 4. $q_p = 5,3 \cdot 10^5$ Кл.
5. $N = 7,5 \cdot 10^5$.

Упражнение 13

1. $F = 8,1$ мН; уменьшится в 2,0 раза. 2. В 2 раза. 3. $r_2 = 53$ см.
 4. $F = 4,5$ мН. 5. $q_1 = q_2 = 3,4 \cdot 10^{-12}$ Кл. 6. $q_2 = -74$ нКл.

Упражнение 14

1. $F = 640$ мН. 2. $|Q| = 4,0 \cdot 10^{-11}$ Кл. 3. $\frac{Q_1}{Q_2} = 16$. 4. $E_A = 63 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$.
 5. $E = 49 \frac{\text{B}}{\text{м}}$.

Упражнение 15

1. Не зависит. $A_A = A_B = 0$. 2. $A = -10$ мДж, $\Delta W_{\text{п}} = 10$ мДж. 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. $\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = 3$. 6. $E = 0,72 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$, $\varphi_p = 0$.

Упражнение 16

1. $q = 40$ нКл. 2. $U = 1,44 \cdot 10^9$ В. 3. $E = 40 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$. 4. $U_{23} = 0,24$ кВ.
 5. $q = 0,13$ нКл. 6. $U_{12} = -21$ В.

Упражнение 17

1. $C = 25$ мкФ. 2. $d = 4,9$ мм. 3. $\frac{C_2}{C_1} = 6$. 4. $q = 0,80$ мкКл. 5. $E = 0,45 \frac{\text{MB}}{\text{м}}$.
 6. $E_2 = 8,4 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$. 7. $d = 5,0$ мм.

Упражнение 18

1. $W = 4,0$ мДж. 2. $d = 2,00$ см. 3. $W_2 = 4$ мкДж. 4. $W = 0,22$ мкДж,
 $E = 25 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$. 5. $E = 22 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$, $U_2 = 0,66$ кВ.

Задания для самоконтроля

1. 4. 2. $N'_1 = 1,5 \cdot 10^8$. 3. Увеличится в $\gamma = 20$ раз. 4. $F_p = 2,7 \cdot 10^{-7}$ Н,
 направлена к заряду q_1 . 5. $|q| = 1$ мкКл. 6. $x = 14$ м. 7. $\alpha = 5^\circ$.
 8. $E_p = 6,8 \frac{\text{kB}}{\text{м}}$. 9. а) $\varphi = 0,36$ кВ; б) $\varphi = -0,36$ кВ; в) $\varphi = 0$ В. 10. а) $\Delta W_{\text{п}} = 8,0 \cdot 10^{-18}$ Дж; б) $\Delta W_{\text{п}} = -8,0 \cdot 10^{-18}$ Дж; в) $\Delta W_{\text{п}} = \Delta W_{\text{к}} = 0$ Дж.
 11. $\frac{v_e}{v_p} = 43$. 12. $E_p = 10 \frac{\text{B}}{\text{м}}$. 13. $U_{AB} = 1,4$ кВ. 14. $A_{\text{внеш}}^{\min} = 310$ мДж.
 15. $\epsilon = 2,25$. 16. $\frac{F_{\text{упр}2}}{F_{\text{упр}1}} = 1,1$. 17. $t = 5,3 \cdot 10^{-8}$ с. 18. $C = 5$ нФ.
 19. $\epsilon_2 = 4$. 20. $C = 5,1$ мкФ.

Упражнение 19

1. $I = 2 \text{ А}$, $U_1 = 4 \text{ В}$, $U_2 = 1 \text{ В}$. 3. $I_{\text{к.з}} = 5,5 \text{ А}$. 4. $I_{\text{к.з}} = 6 \text{ А}$, $r = 0,5 \text{ Ом}$.
 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. $A_{\text{полезн}} = 12 \text{ кДж}$; $\eta = 83 \%$. 9. 1, 3, 5.

Упражнение 20

1. а) По ходу движения часовой стрелки; б) перпендикулярно плоскости рисунка к наблюдателю. 2. Стрелка повернётся на некоторый угол $\alpha < 90^\circ$ северным полюсом к наблюдателю. 3. Стрелка повернётся южным полюсом к наблюдателю. 4. Катушки будут отталкиваться. 5. Электрический ток в соленоиде идёт от клеммы B к клемме A .

Упражнение 21

1. $F_{\text{max}} = 1,6 \text{ Н}$, $F_{\text{min}} = 0$. 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. $B_p = 0,05 \text{ Тл}$. 6. $B_{1\text{max}} = 0,05 \text{ Тл}$. 7. $B_{2\text{min}} = 0,03 \text{ Тл}$.

Упражнение 22

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. $U = 14 \text{ кВ}$.

Упражнение 23

1. а) К соленоиду; б) от соленоида. 2. а) $\Phi_1 = 18 \text{ мВб}$; б) $\Phi_2 = 0$;
 в) $\Phi_3 = 9,0 \text{ мВб}$. 3. $\Phi = 32 \text{ мВб}$. 4. $\Delta t = 0,25 \text{ с}$. 5. $\Phi_1 = 1,0 \text{ мВб}$.

Упражнение 24

1. $L = 2,5 \text{ мГн}$. 2. $L = 0,50 \text{ Гн}$. 3. $\mathcal{E}_c = -8,0 \text{ В}$, $\Delta W_m = 19 \text{ Дж}$.
 4. При $0 \leq t \leq 10 \text{ с}$ $\mathcal{E}_{c1} = -6,0 \text{ мВ}$, при $t > 10 \text{ с}$ $\mathcal{E}_{c2} = 0$. 5. $L = 80 \text{ мГн}$,
 $W_{m1} = 4,0 \text{ Дж}$. 6. $\mathcal{E}_c = 1,4 \text{ В}$.

Задания для самоконтроля

1. $F = 0,60 \text{ мкН}$. 2. 2. 3. $\Delta l = 10 \text{ см}$. 4. 2. 5. $\frac{q_1}{q_2} = 8,0$. 6. $t = 33 \text{ мкс}$.
 7. $\mathcal{E}_{\text{инд}} = -1,9 \text{ В}$. 8. $\mathcal{E}_{\text{инд}}^{\text{max}} = 0,18 \text{ В}$. 9. $I_{\text{инд}} = 40 \text{ мА}$. 10. $(t_3; t_4)$. 11. $\Phi = 17 \text{ мВб}$.
 12. $\Phi_c = 0,30 \text{ Вб}$.

Глоссарий

А

Абсолютная влажность воздуха — физическая величина, равная плотности водяного пара, находящегося в воздухе при данных условиях.

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

Анизотропия — зависимость физических свойств (механических, тепловых, электрических, оптических) от направления внутри кристалла.

Б

Броуновское движение — беспорядочное движение взвешенных в жидкости или газе мельчайших растворимых твёрдых частиц размерами порядка 1 мкм и меньше.

В

Внутренняя энергия макроскопического тела — алгебраическая сумма кинетической энергии теплового движения всех частиц, образующих тело, и потенциальной энергии их взаимодействия.

Г

Газовый разряд — прохождение электрического тока через ионизованный газ.

Д

Диффузия — процесс взаимного проникновения частиц соприкасающихся веществ между частицами другого вследствие их теплового движения.

Диэлектрическая проницаемость вещества — физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль сил электростатического взаимодействия зарядов в данной однородной среде меньше, модуля сил взаимодействия этих же зарядов в вакууме: $\epsilon = \frac{F_0}{F}$.

И

Индукция магнитного поля — физическая векторная величина, модуль которой равен отношению максимального значения силы, действующей со стороны магнитного поля на прямолинейный участок проводника с током, к произведению силы тока в нём и длины этого участка: $B = \frac{F_{\max}}{I\Delta l}$.

Индукционный ток — электрический ток, возникающий в замкнутом проводящем контуре при любом изменении магнитного потока через поверхность, ограниченную этим контуром.

К

Количество вещества — отношение числа частиц этого вещества к постоянной Авогадро: $v = \frac{N}{N_A}$.

Количество теплоты — количественная мера энергии, сообщённой телу (или отданной им) в процессе теплообмена.

Концентрация частиц — физическая величина, численно равная числу частиц, содержащихся в единичном объёме: $n = \frac{N}{V}$.

Коэффициент полезного действия теплового двигателя — отношение полезно используемой энергии к общему количеству энергии, получаемому системой: $\eta_s = \frac{E_{\text{полезн}}}{E}$.

Коэффициент полезного действия источника тока — отношение полезной мощности тока на внешнем участке цепи к полной мощности, развиваемой сторонними силами источника тока: $\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} \cdot 100 \%$.

Кристаллы — твёрдые тела, атомы, ионы или молекулы которых совершают тепловые колебания около определённых, упорядоченных в пространстве положений равновесия.

Л

Линии индукции магнитного поля — воображаемые направленные линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением индукции магнитного поля.

Линии напряжённости электростатического поля — воображаемые направленные линии в пространстве, касательные к которым в каждой точке поля совпадают с направлением напряжённости электростатического поля.

М

Магнитное поле — особая форма материи, создаваемая движущимися относительно определённой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами или переменными электрическими полями.

Магнитный поток через плоскую поверхность, находящуюся в однородном магнитном поле, — физическая скалярная величина, равная произведению модуля индукции магнитного поля, площади поверхности и косинуса угла между направлениями нормали к этой поверхности и индукции магнитного поля: $\Phi = BS \cos \alpha$.

Молекулярная физика — раздел физики, в котором изучают свойства тел и происходящие в них процессы, связанные с огромным числом частиц, содержащихся в этих телах.

Молярная масса — масса вещества, взятого в количестве $v = 1$ моль: $M = \frac{m}{v}$.

Монокристаллы — твёрдые тела, имеющие во всем объёме единую кристаллическую решётку.

Н

Напряжённость электростатического поля — физическая векторная величина, равная отношению силы, с которой поле действует на пробный заряд, к значению этого заряда: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$.

Насыщенный пар — пар, находящийся в состоянии динамического равновесия с жидкостью.

Ненасыщенный пар — пар, давление (плотность) которого меньше давления (плотности) насыщенного пара при той же температуре.

O

Однородное магнитное поле — поле, индукция которого во всех точках пространства одинакова.

Однородное электростатическое поле — поле, напряжённость которого во всех точках пространства одинакова.

Относительная влажность воздуха — физическая величина, равная отношению абсолютной влажности к плотности насыщенного водяного пара при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho_p}{\rho_n} \cdot 100 \%$$

P

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

Плазма — полностью или частично ионизованный газ, в котором концентрации положительных и отрицательных зарядов практически совпадают, т. е. средние объёмные плотности положительных и отрицательных зарядов одинаковы по модулю.

Поликристаллы — твёрдые тела, состоящие из большого числа сросшихся между собой маленьких кристаллов.

Постоянный ток — модель электрического тока, в которой сила тока не зависит от времени при неизменном распределении заряда в проводнике.

Потенциал электростатического поля в данной точке пространства — физическая скалярная величина, равная отношению потенциальной энергии пробного заряда, помещённого в данную точку поля, к значению этого заряда: $\varphi = \frac{W_n}{q_0}$.

P

Разность потенциалов между двумя точками электростатического поля — физическая скалярная величина, равная отношению работы, совершаемой силой поля при перемещении пробного заряда из начальной точки в конечную, к значению этого заряда: $U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0}$.

C

Самоиндукция — явление возникновения ЭДС индукции в электрической цепи в результате изменения силы тока в этой же цепи.

Сверхпроводимость — состояние, при котором электрическое сопротивление проводника уменьшается до нуля.

T

Тепловые двигатели — двигатели, в которых происходит превращение части внутренней энергии сжигаемого топлива в механическую работу.

Тепловое движение — беспорядочное движение частиц вещества, интенсивность которого зависит от температуры тела.

Тепловое равновесие — состояние изолированной физической системы, при котором все её макроскопические параметры остаются неизменными с течением времени.

Теплообмен — самопроизвольный процесс передачи внутренней энергии от тела с большей температурой телу с меньшей температурой без совершения работы.

Термический коэффициент полезного действия теплового двигателя — отношение работы, совершаемой рабочим телом за цикл, к количеству теплоты, полученному им от нагревателя: $\eta_t = \frac{A_{\text{п}}}{Q_1}$.

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).

Точка росы — температура, при которой водяной пар в результате изобарного охлаждения становится насыщенным.

У

Узлы кристаллической решётки — положения устойчивого равновесия колеблющихся частиц (ионов, атомов или молекул), образующих кристалл.

Э

Электрический заряд — физическая скалярная величина, характеризующая интенсивность электромагнитного взаимодействия тел (частиц).

Электрическая ёмкость конденсатора — физическая скалярная величина, равная отношению заряда конденсатора к напряжению между его обкладками: $C = \frac{q}{U}$.

Электрический ток — направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц — носителей заряда.

Электродвижущая сила (ЭДС) — физическая скалярная величина, равная отношению работы сторонней силы по перемещению положительного электрического заряда внутри источника тока от его отрицательного полюса к положительному к значению этого заряда: $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}$.

Электродинамика — раздел физики, в котором изучают электромагнитное взаимодействие между электрически заряженными телами и частицами.

Электролиты — вещества, растворы или расплавы которых проводят электрический ток.

Электролиз — процесс выделения на электроде вещества, связанный с окисительно-восстановительными реакциями, протекающими при прохождении электрического тока через растворы (расплавы) электролитов.

Электромагнитная индукция — явление возникновения ЭДС индукции в контуре, который либо покоятся в изменяющемся во времени магнитном поле, либо движется в постоянном магнитном поле так, что магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром, меняется.

Электростатика — раздел электродинамики, в котором изучают взаимодействие неподвижных в некоторой инерциальной системе отсчёта электрически заряженных тел, распределение заряда на которых не изменяется со временем, а также электростатические поля, создаваемые зарядами таких тел.

Электростатическое поле — поле, создаваемое неподвижными относительно используемой инерциальной системы отсчёта электрическими зарядами.

Предметный указатель

А

- Агрегатное состояние вещества
 - газообразное 18
 - жидкое 56
 - плазменное 228
 - твёрдое 49
- Аморфное состояние вещества 54
- Ампер (единица силы электрического тока) 178
- Анизотропия 52
- Атомная единица массы 14

В

- Вебер (единица магнитного потока) 198
- Взаимодействие
 - магнитное 175
 - электростатическое 175
- Влажность воздуха
 - абсолютная 63
 - относительная 64
- Вольт
 - (единица потенциала электростатического поля) 137
 - (единица разности потенциалов поля) 141

Г

- Газ
 - идеальный 19
- Гальванопластика 222
- Гальваностегия 222
- Генри (единица индуктивности) 206

Д

- Давление
 - идеального газа 20

насыщенного пара 61

парциальное 33

Двигатель тепловой 99

Движение

броуновское 9

тепловое 9

заряженных частиц в однородном магнитном поле 193

Диффузия 10

Диэлектрическая проницаемость вещества 120

З

- Закон
 - Ампера 188
 - Кулона 118
 - термодинамики
 - второй 98
 - первый 92
- Ома
 - для участка электрической цепи 163
 - для полной электрической цепи 169
 - сохранения и превращения энергии 91
 - сохранения электрического заряда 115
 - электромагнитной индукции 203

Заряд

пробный 124

точечный 117

электрический 113

элементарный 113

И

Изобара 38

Изопроцесс 36
 изобарный 37
 изотермический 36
 изохорный 38
Изотерма 37
Изотропность 53
Изохора 39
Индукция магнитного поля 187
Ионизация газа 224
Ионизатор 225
Испарение 60

К

Кельвин (единица температуры) 26
Количество
 вещества 14
 теплоты 84
Конденсатор 146
 плоский 149
Конденсация 60
Концентрация частиц 10
Короткое замыкание 170
Коэффициент
 полезного действия
 источника тока 171
 теплового двигателя 100
 термический 100
 эффективный 101
 самоиндукции (индуктивность)
 206
Кулон (единица электрического заряда) 113

Л

Линии
 напряжённости электростатического поля 132
 индукции магнитного поля 181

М

Магнитный поток 197
Масса
 молярная 15
 относительная молекулярная (атомная) 14
Молекулярная физика 5
Молекулярно-кинетическая теория 5
Монокристалл 52

Н

Напряжённость электростатического поля 126

О

Основные положения МКТ 7
Основное уравнение МКТ 20

П

Пар
 насыщенный 61
 ненасыщенный 62
 перенасыщенный 66
Параметры
 макроскопические 19
 микроскопические 19
Плазма 228
Поле
 вихревое 181
 магнитное 176
 однородное 133, 182
 потенциальное 135
 электрическое 249
 электростатическое 124
Поликристалл 53
Полупроводники
 дырочные (*p*-типа) 233
 электронные (*n*-типа) 232

- Постоянная
Авогадро 15
Больцмана 26
универсальная газовая 33
электрическая 118
- Потенциал электростатического поля 137
- Правило
буравчика 181
левой руки 188, 193
Ленца 201
правой руки 182
часовой стрелки 183
- Принцип суперпозиции
для потенциала электростатического поля 137
магнитных полей 188
электростатических полей 128
- Проводимость
дырочная 233
ионная 222
ионно-электронная 225
примесная 232
собственная 231
электронная 217
- Процесс
изобарный 37
изотермический 36
изохорный 38
- Психрометр 66
- P**
- Работа
газа 77
силы
электрического тока 168
электростатического поля 134
- Равновесие
тепловое 24
динамическое 60
- Разность потенциалов 141
- Разряд
газовый 225
несамостоятельный 225
самостоятельный 225
дуговой 226
искровой 227
коронный 226
тлеющий 225
- Рекомбинация 225
- C**
- Самоиндукция 206
- Сверхпроводимость 219
- Сила
Ампера 187
Лоренца 192
тока 163
короткого замыкания 170
- Силы
магнитные 178
межмолекулярного взаимодействия 11
сторонние 165
- Система
изолированная (замкнутая) 24
термодинамическая 71
- Скорость средняя квадратичная 20, 27
- T**
- Тело
кристаллическое 49
макроскопическое 6
моноокристаллическое 52

Температура абсолютная 26
 Теплообмен 83
 Термодинамика 5
 Термометр сопротивления 219
 Терморезистор 233
 Тесла (единица индукции магнитного поля) 187
 Ток
 индукционный 199
 постоянный 163
 электрический 163
 в газах 224
 в металлах 217
 в полупроводниках 230
 в электролитах 221
 Точка росы 66

У

Удельная
 теплоёмкость вещества 84
 теплота
 парообразования 85
 плавления 85
 сгорания топлива 86
 Уравнение состояния
 идеального газа 31
 Клапейрона–Менделеева 33
 Участок цепи
 внешний 166
 внутренний 166

Ф

Фарад (единица электроёмкости) 148
 Фоторезистор 233

Ш

Шкала температурная 26

Э

Электродвижущая сила (ЭДС)
 индукции 199
 источника тока 166
 самоиндукции 206
 Электродинамика 111
 Электроёмкость
 конденсатора 148
 плоского конденсатора 150
 Электролиз 222
 Электролит 221
 Электромагнитная индукция 200
 Электростатика 112
 Энергия
 внутренняя 72
 идеального одноатомного газа 73
 ионизации 224
 средняя кинетическая поступательного движения молекул 20
 электростатического поля конденсатора 154
 магнитного поля катушки 208

СОДЕРЖАНИЕ

Как работать с учебным пособием	3
---------------------------------------	---

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

ГЛАВА 1. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

§ 1. Основные положения молекулярно-кинетической теории	7
§ 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.....	24
§ 5. Уравнение состояния идеального газа	31
§ 6. Изотермический, изобарный и изохорный процессы.....	36
Обобщение и систематизация знаний.....	44
§ 7. Строение и свойства твёрдых тел	49
§ 8. Строение и свойства жидкостей	56
§ 9. Испарение и конденсация. Насыщенный пар	59
§ 10. Влажность воздуха.....	63

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 11. Термодинамическая система. Внутренняя энергия. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа.....	71
§ 12. Работа в термодинамике.....	77
§ 13. Количество теплоты	83
§ 14. Первый закон термодинамики. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам изменения состояния идеального газа ..	91
§ 15. Тепловые двигатели. Принцип действия тепловых двигателей и их КПД. Экологические проблемы использования тепловых двигателей.....	98
Обобщение и систематизация знаний.....	106
Темы проектных заданий по разделу «Молекулярная физика»	110

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 16. Электрический заряд. Закон сохранения электрического заряда.....	112
§ 17. Взаимодействие точечных зарядов. Закон Кулона	117
§ 18. Электростатическое поле	124
§ 19. Напряжённость электростатического поля. Принцип суперпозиции.....	126
§ 20. Линии напряжённости электростатического поля	132

§ 21. Работа силы однородного электростатического поля. Потенциал	134
§ 22. Разность потенциалов электростатического поля.	
Напряжение. Связь между напряжением	
и напряжённостью однородного электростатического поля	141
§ 23. Конденсаторы. Электроёмкость конденсатора.	
Электроёмкость плоского конденсатора.	146
§ 24. Энергия электростатического поля конденсатора	153
Обобщение и систематизация знаний	158

ГЛАВА 4. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 25. Условия существования постоянного электрического тока.	
Сторонние силы. ЭДС источника тока.	165
§ 26. Закон Ома для полной электрической цепи. КПД источника тока	168

ГЛАВА 5. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 27. Действие магнитного поля на проводник с током.	
Взаимодействие проводников с током	175
§ 28. Индукция магнитного поля. Линии индукции магнитного поля	180
§ 29. Сила Ампера. Принцип суперпозиции магнитных полей	186
§ 30. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле	191
§ 31. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции	197
§ 32. Правило Ленца. Закон электромагнитной индукции	201
§ 33. Явление самоиндукции. Индуктивность.	
Энергия магнитного поля катушки с током	206
Обобщение и систематизация знаний	212

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

§ 34. Электрический ток в металлах. Сверхпроводимость	217
§ 35. Электрический ток в электролитах	220
§ 36. Электрический ток в газах. Плазма	224
§ 37. Электрический ток в полупроводниках.	
Собственная и примесная проводимости полупроводников	229
Обобщение и систематизация знаний	236
Темы проектных заданий по разделу «Электродинамика»	237
Лабораторный эксперимент	238
Приложение	247
Ответы	250
Глоссарий	254
Предметный указатель	258

(Название учреждения образования)

Учебный год	Имя и фамилия учащегося	Состояние учебного пособия при получении	Оценка 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
(с электронным приложением для повышенного уровня)

Редактор	<i>Е. А. Пастушенко</i>
Техническое редактирование	<i>И. М. Кузьменковой, Е. П. Шатило</i>
Художник обложки	<i>Е. В. Максимова</i>
Художники	<i>А. А. Ламанова, К. К. Шестовский</i>
Компьютерный набор	<i>Н. А. Пятковской, Е. П. Шатило</i>
Компьютерная вёрстка	<i>Н. А. Пятковской, Е. П. Шатило</i>
Корректор	<i>Г. И. Кошевникова</i>

Подписано в печать 17.12.2019. Формат 70x90 $\frac{1}{16}$.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 19,3. Уч.-изд. л. 14,0. Тираж 121 000 экз. Заказ

Республикансское унитарное предприятие «Издательство “Адукацыя і выхаванне”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/19 от 02.08.2013.
Ул. Будённого, 21, 220070, г. Минск.

Республикансское унитарное предприятие «Издательство “Белорусский Дом печати”».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий № 2/102 от 02.03.2013.
Пр-т Независимости, 79, 220013, г. Минск.

Правообладатель Адукацыя і выхаванне

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА