



А.В. Грачёв
В.А. Погожев
Е.А. Вишнякова

Физика

8



вентана
граф

Приставки кратных единиц

Название	Обозначение	Кратность
экса	Э	$10000000000000000000 = 10^{18}$
пета	П	$1000000000000000 = 10^{15}$
гига	Г	$1000000000 = 10^9$
мега	М	$1000000 = 10^6$
кило	к	$1000 = 10^3$
дэци	д	$0,1 = 10^{-1}$
санти	с	$0,01 = 10^{-2}$
милли	м	$0,001 = 10^{-3}$
микро	мк	$0,000001 = 10^{-6}$
нано	н	$0,000000001 = 10^{-9}$
пико	п	$0,000000000001 = 10^{-12}$
фемто	ф	$0,000000000000001 = 10^{-15}$
атто	а	$0,0000000000000001 = 10^{-18}$

Физические величины

Наименование величины	Обозна- чение	Наименование единицы	Единица измерения
Температура	<i>T</i>	kelvin	K
Теплота	<i>Q</i>	дюйль	Дж
Теплоёмкость	<i>C</i>	дюйль на кельвин	Дж/К
Удельная теплота сгорания	<i>q</i>	дюйль на килограмм	Дж/кг
Внутренняя энергия	<i>U</i>	дюйль	Дж
Удельная теплота плавления	<i>λ</i>	дюйль на килограмм	Дж/кг
Сила тока	<i>I</i>	ампер	A
Электрический заряд	<i>q</i>	кулон	Кл
Напряжённость электрического поля	<i>E</i>	вольт на метр	В/м
Напряжение электрического поля	<i>U</i>	вольт	V
Электрическая ёмкость	<i>C</i>	фарад	Ф
Электрическое сопротивление	<i>R</i>	ом	Ом
Магнитная индукция	<i>B</i>	tesla	Тл

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Постоянная Авогадро $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$

Интервалы температур, измеряемые различными термометрами:

- 1) жидкостные от -38°C до 260°C
- 2) термопары от -269°C до 2300°C
- 3) на основе электросопротивления от -260°C до 900°C

Соотношения единиц температуры: $1^{\circ}\text{C} = 1\text{ K} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{F}$

Температура плавления льда $0^{\circ}\text{C} = 273\text{ K} = 32^{\circ}\text{F}$

Температура кипения воды $100^{\circ}\text{C} = 373\text{ K} = 212^{\circ}\text{F}$

Характерные температуры:

кипение гелия	4,2 K
кипение водорода	20 K
кипение воды	373 K
плавление золота	1336 K
поверхность Солнца	6000 K
в центре Солнца	10^7 K

Заряд протона $q_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Заряд электрона $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл

Напряжение:

пальчиковой батарейки 1,5 В

аккумулятора автомобиля 12 В

Характерные значения силы тока:

в лампочке карманного фонаря 0,3 А

в спирали электрочайника 5 А

в стартере автомобиля 60 А



Алгоритм успеха

*A.B. Грачёв
В.А. Погожев
Е.А. Вишнякова*

Физика

8 класс

Учебник
для учащихся
общеобразовательных
организаций

Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации

*2-е издание,
доработанное и исправленное*



Москва
Издательский центр
«Вентана Граф»
2017

ББК 22.3я721
Г78

Учебник включён в федеральный перечень

Грачёв А.В.
Г78 Физика : 8 класс : учебник для учащихся общеобразовательных организаций / А.В. Грачёв, В.А. Погожев, Е.А. Вишнякова. – 2-е изд., дораб. и испр. – М. : Вентана-Граф, 2017. – 320 с. : ил.

ISBN 978-5-360-08013-8

Учебник рассчитан на учащихся общеобразовательных школ. Настоящее издание входит в систему учебников «Алгоритм успеха» и вместе с рабочими тетрадями, тетрадью для лабораторных работ и методическим пособием для учителей составляет учебно-методический комплект по физике для 8 класса. В учебнике представлены разделы «Тепловые явления» и «Электромагнитные явления».

Соответствует федеральному государственному образовательному стандарту основного общего образования (2010 г.).

ББК 22.3я721

Учебное издание

Грачёв Александр Васильевич
Погожев Владимир Александрович
Вишнякова Екатерина Анатольевна

Физика

8 класс

Учебник для учащихся общеобразовательных организаций

Редактор *А.И. Троицкий*. Художественный редактор *Е.В. Чайко*
Компьютерная вёрстка *Н.И. Беляевой, Н.П. Горловой, О.В. Игнатовой, М.В. Никитиной*
Технический редактор *Л.В. Коновалова*. Корректоры *А.С. Цибулина, О.Ч. Кохановская*

Подписано в печать 08.08.16. Формат 70×90/16. Гарнитура NewBaskervilleC
Печать офсетная. Бумага офсетная № 1. Печ. л. 20,0. Тираж 1000 экз. Заказ №14515

ООО Издательский центр «Вентана-Граф»

127422, Москва, ул. Тимирязевская, д. 1, стр. 3
E-mail: info@vgf.ru, http://www.vgf.ru



Предложения и замечания по содержанию и оформлению книги
можно оставить на сайте издательства «Вентана-Граф» (www.vgf.ru) или на сайте
Объединенной издательской группы «Дрофа» – «Вентана-Граф» (drofa-ventana.ru)
По вопросам приобретения продукции издательства обращайтесь:
тел.: 8-800-700-64-83; e-mail: sales@vgf.ru; <https://www.drofa-ventana.ru/buy/>

Отпечатано в типографии ООО «ЛД-ПРИНТ»

196644, Санкт-Петербург, Колпинский р-н, пос. Саперный,
территория предприятия «Балтика», д. б/н, лит. Ф.
тел. (812) 462-83-83, e-mail: office@ldprint.ru

© Грачёв А.В., Погожев В.А., Вишнякова Е.А., 2012

© Издательский центр «Вентана-Граф», 2012

© Грачёв А.В., Погожев В.А., Вишнякова Е.А., 2014,
с изменениями

© Издательский центр «Вентана-Граф», 2014,
с изменениями

ISBN 978-5-360-08013-8

Дорогие ребята!

Этот учебник вы будете использовать во время урока, например, чтобы усвоить новый материал, научиться правильно решать задачи. Но с учебником можно работать и дома: самому разобраться в проблеме, найти ответ на непростой вопрос, хорошо подготовиться к уроку или контрольной работе. В учебнике достаточно подробно изложены нужные вам знания, и, если на уроке вы что-то упустили, поработайте самостоятельно: внимательно прочтите текст параграфа, постарайтесь решить предложенные в нём упражнения. Обращайте внимание на места, где стоят значки.



Это важно! Так отмечены основные положения в тексте параграфа.

- К** *Комментарии.* Это вспомогательные тексты, поясняющие отдельные положения параграфа; советы, какими пользоваться; различные напоминания и т. п.
- С** *Справочные материалы:* сведения из истории физики; интересная дополнительная информация; данные, которые могут потребоваться для решения задач.
- С** *Совместная работа.* Так отмечены задания, требующие для успешного выполнения совместной работы двух и более учащихся.
- ✓** *Проектная работа.* Эти задания выполняются по проекту под руководством учителя.

Итоги. В конце каждого параграфа приведены сведения, которые являются в нём главными – тем, без чего нельзя усвоить содержание учебника. Внимательно прочтите эти итоги, спрашивая себя: всё ли в них понятно? При необходимости ещё раз обратитесь к соответствующему месту в учебнике.

Вопросы. Для того чтобы проверить, насколько успешно вы усвоили основное в данном параграфе, постарайтесь ответить на заданные вопросы и только после этого переходите к упражнениям.

Упражнения. В учебнике в конце параграфов приводятся упражнения, которые вы будете выполнять дома, после того как убедитесь, что поняли содержание параграфа.

Более сложные упражнения отмечены знаком *.

Знаком  (для дополнительного изучения) в учебнике отмечены те места, в том числе параграфы, которые адресованы всем, кто интересуется физикой и стремится расширить свои знания.

Кроме условных обозначений, облегчающих работу с книгой, вам встретятся в учебнике и особо выделенные тексты.

Так, **формулировки законов** набраны другим шрифтом и цветом.

Таким же шрифтом обычного цвета набраны тексты **определений**.

Текст, на который при чтении следует обратить внимание, выделен **курсивом**. Как правило, это отдельные выводы или ключевые для понимания слова или фразы.

В разделе «Ответы» приведены ответы к некоторым вопросам и задачам из учебника, чтобы можно было проверить свою работу.

В конце учебника имеется предметный указатель. Если вам потребуется найти в книге какое-либо понятие или определение, загляните в указатель. Там приведены страницы учебника, на которых встречается нужное вам слово.

Надеемся, всё это облегчит вам работу с учебником.

Молекулярная теория строения вещества

До сих пор мы рассматривали самую простую форму движения материи — прямолинейное механическое движение. При этом, как правило, мы считали тела точечными и не интересовались их строением. Однако для объяснения таких процессов, как нагревание и охлаждение тел, переход вещества из твёрдого состояния в жидкое и газообразное, деформация тел, и многих других необходимо знание строения вещества. Как устроено вещество? Что с ним происходит при его нагревании и охлаждении? Ответы на эти и подобные вопросы дают разделы физики, к изучению которых мы приступаем.

Мы начнём изучение строения вещества и его свойств с современных представлений, к которым люди пришли, обобщив накопленный за столетия экспериментальный материал.

§ 1

Вещество и его структурные единицы

Из курса естествознания вы знаете, что окружающие нас тела состоят из разных веществ и обладают разными свойствами. Существуют такие тела, которые состоят только из одного вещества, например чистая вода, поваренная соль, природный газ метан. Другие тела, напротив, состоят из нескольких различных веществ. Так, окружающий нас воздух является смесью различных веществ — газов: азота (~78 %), кислорода (~21 %), водорода (~0,9 %), углекислого газа (~0,03 %) и других газов. Свинцовая гиря состоит только из свинца, а бронзовый колокол — из сплава двух веществ: меди (~78 %) и олова (~22 %).

Вам также известно, что *мельчайшие частицы вещества, имеющие все химические признаки этого вещества, называют молекулами*. При этом все молекулы данного вещества одинаковы. Так, вода состоит из

одинаковых молекул воды и поэтому сохраняет свои свойства, где бы она ни находилась — в организме человека, в реке или в каплях дождя.

Молекулы разных веществ отличаются друг от друга. Поэтому разные вещества имеют разные свойства.

Наверняка вы уже слышали, что молекулы состоят из ещё более мелких структурных единиц — атомов. Есть вещества, молекулы которых состоят из одного атома. Таковыми являются некоторые (инертные) газы и пары металлов. Однако молекулы большинства веществ состоят из двух и более атомов.

Существуют молекулы, образованные одинаковыми атомами. Вещества, состоящие из таких молекул, называют *простыми*. Если же молекулы вещества образованы из разных атомов, то такое вещество называют *сложным*.

На рис. 1 приведены модели молекул нескольких простых и сложных веществ. Атомы, как это принято, обозначены специальными символами: Н — атом водорода, О — атом кислорода, N — атом азота. Линии между атомами условно изображают связи между ними, благодаря которым атомы объединяются в молекулу. Молекула водорода H_2 состоит из двух атомов водорода Н; молекула кислорода O_2 — из двух атомов кислорода О. Водород и кислород — простые вещества. Молекула воды H_2O состоит из двух атомов водорода Н и одного атома кислорода О, а молекула аммиака NH_3 — из одного атома азота N и трёх атомов водорода Н. Вода и аммиак — сложные вещества.

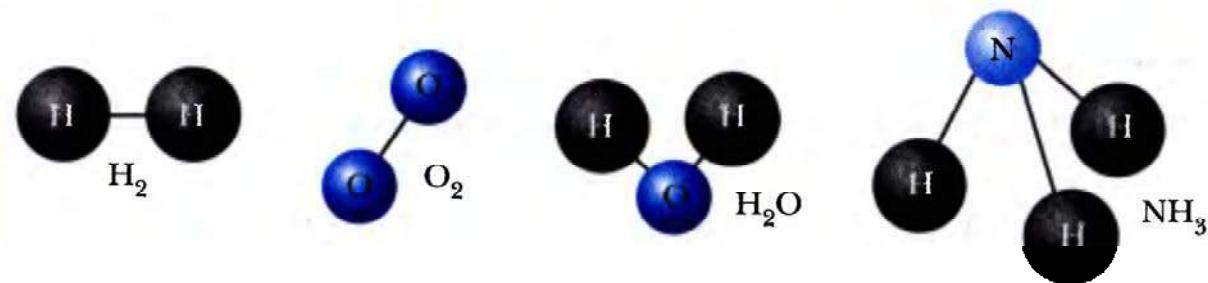


Рис. 1 Модели молекул некоторых веществ

В начале XX в. было установлено, что атомы, в свою очередь, состоят из ещё более мелких частиц: электронов, протонов и нейтронов. Со строением атомов более подробно вы познакомитесь в курсах химии и физики.

Окружающие нас тела состоят из разных веществ.

Существуют тела, которые состоят только из одного вещества. Другие тела состоят из нескольких различных веществ.

Мельчайшие частицы вещества, имеющие все химические признаки этого вещества, называют молекулами.

Все молекулы данного вещества одинаковы. Молекулы разных веществ отличаются друг от друга.

Молекулы состоят из ещё более мелких структурных единиц – атомов. Вещество, молекулы которого состоят из одинаковых атомов, называют *простым*. Если же молекула вещества состоит из разных атомов, то такое вещество называют *сложным*.

Вопросы

- 1** Что называют молекулой?
- 2** Могут ли молекулы одного вещества иметь разный состав?
- 3** Какие вещества называют простыми, а какие сложными? Приведите примеры таких веществ.
- 4** Сколько и каких атомов входит в состав молекулы водорода; кислорода; аммиака; воды?
- 5** Какие составные части атома вы знаете?

§ 2

Свойства вещества. Модель молекулы

Каждое вещество обладает определёнными свойствами, отличающими его от других веществ. Оказывается, эти свойства можно разделить на три большие группы.

Свойства первой группы определяются строением и составом молекул вещества. От них зависит в первую очередь способность веществ вступать в различные химические реакции. Яркими примерами проявления таких свойств являются запах и вкус вещества. Изучать эти свойства вы будете в курсе химии.

Свойства второй группы определяются в основном характером движения молекул вещества друг относительно друга и тем, как эти молекулы

взаимодействуют между собой. От этого зависят такие известные вам свойства вещества, как сжимаемость, текучесть, способность нагреваться и охлаждаться.

Третья группа свойств определяется как строением молекул вещества, так и особенностями их движения и взаимодействия. К третьей группе свойств можно отнести, например, такие свойства вещества, как особенности взаимодействия со светом, от которых зависит цвет вещества.

В этом курсе нас будут интересовать в основном свойства, относящиеся ко второй группе.

Многочисленные эксперименты и расчёты показывают, что для тех явлений и процессов, которые вы будете изучать, при объяснении многих свойств вещества можно не учитывать строение молекул. В этих случаях молекулы вещества считают неизменными, представляя их в виде маленьких жёстких шариков, обладающих массой.



Процесс замены сложного физического объекта на более простой учёные называют моделированием (выбором модели).

Такая замена делается для того, чтобы представить изучаемые объекты и процессы в более простом виде. В нашем случае объект со сложным строением (молекулу) мы заменяем на модель — простой объект, представляющий собой маленький жёсткий шарик, обладающий массой. Понятно, что молекула вещества не является шариком. Тем не менее во многих процессах молекулы ведут себя подобно шарикам. Поэтому при изучении и описании свойств вещества, которое участвует в таких процессах, принятая нами модель оказывается допустимой.

Диаметр шарика — модели молекулы — очень мал. Например, молекулу воды невозможно разглядеть даже в самый современный оптический микроскоп, позволяющий видеть частицы размером $\sim 0,1$ мкм. Следовательно, она значительно меньше. Каковы же размеры молекул?

Первые представления о размерах атомов и молекул экспериментально были получены лишь 100–150 лет назад, почти через две с половиной тысячи лет после того, как древнегреческие учёные Демокрит, Эпикур, Лукреций и другие выдвинули гипотезу о строении вещества. Согласно ей все вещества состоят из мельчайших неизменных частиц, которые были названы атомами. Эта гипотеза получила название *атомарной гипотезы* строения вещества.

На основании каких же экспериментов были получены представления о размерах атомов и молекул?

Ещё в XVIII в. золотых дел мастера умели расплощивать листочки золота до толщины около 10^{-8} м. Позже путём травления удавалось уменьшить толщину этих листочек ещё примерно в 10 раз, т. е. до 10^{-9} м. Следовательно, размер атома золота не превышает одного нанометра ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$).

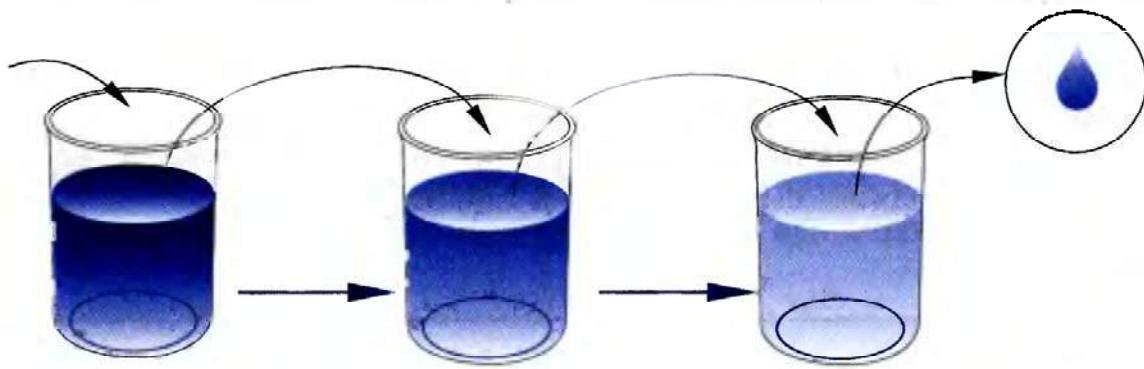


Рис. 2

При многократном разведении чернил в воде раствор сохраняет окраску из-за присутствия огромного числа молекул красящего вещества

Оценить размеры молекул некоторых жидкых веществ можно также, измерив толщину плёнки, которая получается при растекании вещества по поверхности воды или по стеклу. Так, капелька масла растекается по поверхности воды, образуя плёнку, толщина которой сравнима с размерами молекулы.

Заключение об очень малых размерах молекул можно сделать и из того факта, что их число даже в небольшом объёме огромно. Проделаем, например, такой опыт. Разведём 1 см^3 чернил в литре чистой воды (рис. 2). Затем 1 см^3 полученного раствора вновь разведём в литре чистой воды. Мы получим разведение в $1\ 000\ 000$ раз. При этом мы увидим, что получившийся раствор имеет равномерную окраску, которую может различить глаз человека. Следовательно, даже в очень малом объёме находится огромное число молекул красящего вещества.

Современные методы исследования позволяют непосредственно наблюдать не только отдельные молекулы, но даже атомы. Согласно данным этих исследований размер молекулы водорода приблизительно равен $0,2 \text{ нм}$. Примерно такие же размеры имеют молекулы и других наиболее распространённых веществ.

! Все атомы состоят из протонов, нейтронов и электронов. Масса протона примерно равна массе нейтрона и существенно (примерно в 2000 раз) превышает массу электрона. Поэтому **массы молекул всех веществ приблизительно кратны массе протона**.

По международному соглашению, принятому в 1961 г., массы всех молекул и атомов сравнивают с одной двенадцатой массы атома углерода. Эта единица массы получила специальное название: атомная единица массы (а. е. м.).



Атомная единица массы равна 1/12 массы атома углерода.

Согласно современным данным приблизительно можно считать, что 1 а. е. м. = $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг. Масса атома водорода близка к 1 а. е. м.

Примерные значения масс атомов и молекул некоторых веществ в атомных единицах массы приведены в таблице 1.

Таблица 1

Название вещества	Масса атома, а. е. м.	Масса молекулы, а. е. м.
Водород	1	2
Гелий	4	
Азот	14	28
Кислород	16	32
Хлор	35	70
Углерод	12	
Медь	64	
Олово	119	
Вода		18
Углекислый газ		44
Поваренная соль		58

Рассчитаем число атомов углерода, содержащихся в куске углерода массой $M = 12$ г. Для этого выразим массу m_0 атома углерода в граммах:

$$m_0 = 12 \text{ а. е. м.} \approx 12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г} = 19,92 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$

Разделим массу M куска углерода на массу его атома m_0 . Мы получим, что в куске углерода массой $M = 12$ г содержится $N_A = \frac{M}{m_0} \approx 6,02 \cdot 10^{23}$ атомов.

Легко убедиться, что в куске олова массой 119 г будет содержаться столько же атомов олова, сколько атомов углерода содержится в куске углерода массой 12 г (см. таблицу 1). Такое же число N_A молекул водорода будет содержаться в 2 г водорода. Отметим, что при этом число атомов водорода будет вдвое больше числа молекул.

Понятно, что для получения такого же числа молекул кислорода потребуется взять 32 г кислорода (см. таблицу 1). При этом число молекул кислорода будет равно N_A , а число его атомов — $2N_A$.

Число N_A является одной из фундаментальных постоянных. Это число получило специальное название – *постоянная Авогадро*, в честь итальянского учёного Амедео Авогадро (1776–1856).



Постоянная Авогадро — число молекул (атомов) в веществе, масса которого в граммах численно равна массе молекулы (атома) этого вещества, выраженной в атомных единицах массы.

Запомните *постоянную Авогадро*: $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$.

Итоги

При изучении тепловых явлений и некоторых свойств веществ реальную молекулу заменяют её моделью — маленьким жёстким шариком, обладающим массой.

Процесс замены сложного физического объекта на более простой учёные называют моделированием (выбором модели).

Атомы всех веществ состоят из протонов, нейтронов, электронов. Масса протона примерно равна массе нейтрона и существенно (примерно в 2000 раз) превышает массу электрона. Поэтому массы молекул различных веществ приблизительно кратны друг другу.

Атомная единица массы равна $1/12$ массы атома углерода.

$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$

Постоянная Авогадро — число молекул (атомов) в веществе, масса которого в граммах численно равна массе молекулы (атома) этого вещества, выраженной в атомных единицах массы.

Постоянная Авогадро $N_A \approx 6,02 \cdot 10^{23}$.

Вопросы

- 1 В чём состоит атомарная гипотеза строения вещества?
- 2 Что представляет собой простейшая модель молекулы?
- 3 Каковы размеры известных вам атомов и молекул?
- 4 Чему равна атомная единица массы?
- 5 Чему равна масса молекулы кислорода в атомных единицах массы? Как рассчитать её в граммах?

6. Почему массы всех атомов приблизительно в целое число раз превышают массу атома водорода?
7. Что такое постоянная Авогадро? Чему она равна?

Упражнения

1. На рис. 3 приведён снимок атома аргона, полученный с экрана электронного микроскопа, который даёт увеличение в 260 миллионов раз. Пользуясь этим снимком и линейкой, оцените диаметр атома аргона.
При выполнении следующих упражнений воспользуйтесь данными таблицы 1.
2. Вычислите в единицах СИ массы молекул азота, кислорода, меди.
3. Определите число молекул и атомов кислорода, содержащихся в 320 г кислорода.
4. Определите, во сколько раз число молекул водорода, содержащихся в 10 г водорода, превышает число молекул меди, содержащихся в куске меди массой 128 г.
- *5. Молекула поваренной соли состоит из одного атома хлора и одного атома натрия. Вычислите массу атома натрия в атомных единицах массы и в граммах.
- *6. Молекула углекислого газа состоит из атомов кислорода и углерода. Сколько атомов кислорода и углерода входит в состав молекулы углекислого газа?
- ✓ 7. Для оценки размеров молекул используют его свойство образовывать тонкую плёнку (примерно в один слой молекул) при растекании по поверхности воды. *Запланируйте* эксперимент с растеканием капли растительного масла. Считается, что капля объёмом 1 мм^3 при растекании образует на поверхности воды пятно площадью $\sim 0,6 \text{ м}^2$. Предложите способ отмерить каплю масла объёмом не более 1–2 мм^3 , необходимое для этого оборудование и измерительные инструменты. Получите каплю масла такого объёма. Рассчитайте площадь пятна, которое должно получиться при растекании этой капли. Предложите способ измерить площадь масляного пятна экспериментально.

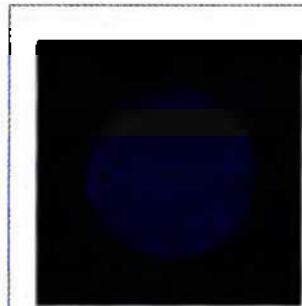


Рис. 3

§ 3

Примеры решения задач

Используем приобретённые знания для решения конкретных задач. Полученные при этом результаты позволят вам лучше понять, как устроен окружающий мир.

Задача 1. Плотность воды при комнатных условиях примерно равна $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$. Оцените число молекул в 1 л воды в бутылке, стоящей на столе в комнате.

Решение.

Масса воды, имеющей при комнатной температуре объём $V = 1 \text{ л} = 10^3 \text{ см}^3$, равна:

$$M = \rho \cdot V = 1 \cdot 10^3 = 10^3 \text{ (г)}.$$

Масса одной молекулы воды согласно данным, приведённым в таблице 1, равна 18 а. е. м. Поэтому масса молекулы воды в граммах $m = 18 \cdot 1.66 \times 10^{-24} \text{ г} \approx 3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$. Следовательно, число молекул воды в бутылке:

$$N = \frac{M}{m} \approx \frac{10^3}{3 \cdot 10^{-23}} \approx 3,3 \cdot 10^{25} \text{ (молекул)}.$$

Ответ: число молекул в 1 л воды примерно равно $3,3 \cdot 10^{25}$.

Задача 2. Оцените средний объём, приходящийся на одну молекулу воды в бутылке, рассмотренной в предыдущей задаче. Оцените среднее расстояние между молекулами воды при комнатных условиях.

Решение.

Поскольку в объёме $V = 10^3 \text{ см}^3$ находится $N = 3,3 \cdot 10^{25}$ молекул воды, то можно считать, что каждая из этих молекул располагается как бы в центре кубика, объём которого равен:

$$v = \frac{V}{N} \approx \frac{10^3}{3,3 \cdot 10^{25}} \approx 30 \cdot 10^{-24} \text{ (см}^3\text{)}.$$

Пользуясь тем, что кубик, длина ребра которого равна a , имеет объём $v = a^3$, при помощи калькулятора найдём ребро кубика, имеющего объём $30 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$. Длина ребра приблизительно равна $3,1 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. Таким образом, среднее расстояние между молекулами воды при комнатных условиях приблизительно равно $3,1 \cdot 10^{-8} \text{ см} = 0,31 \text{ нм}$.

Ответ: на одну молекулу воды в среднем приходится объём $30 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3$; среднее расстояние между молекулами воды при комнатных условиях примерно равно 0,31 нм.

Задача 3. Окружающий нас воздух состоит на 78 % из молекул азота (масса молекулы 28 а. е. м.) и на 21 % из молекул кислорода (масса молекулы 32 а. е. м.). Поэтому вводят понятие «молекула воздуха» и среднюю массу такой «молекулы» принимают приблизительно равной 29 а. е. м. Оцените число молекул в объёме воздуха $V = 1 \text{ м}^3$ в вашей комнате. Плотность воздуха в комнате $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Решение.

Выразим среднюю массу одной молекулы воздуха в граммах:

$$m = 29 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \approx 4,8 \cdot 10^{-23} (\text{г}).$$

Поскольку масса воздуха в объёме $V = 1 \text{ м}^3$ равна $M = \rho \cdot V = 1,2 \cdot 1 = 1,2 \text{ (кг)}$, то общее число молекул воздуха в этом объёме:

$$N = \frac{M}{m} \approx \frac{1,2 \cdot 10^3}{4,8 \cdot 10^{-23}} = 2,5 \cdot 10^{25} (\text{молекул}).$$

Ответ: число молекул в 1 м^3 воздуха примерно равно $2,5 \cdot 10^{25}$.

Обратите внимание на то, что полученное число молекул воздуха в 1 м^3 меньше найденного в задаче 1 числа молекул воды в 1 л. Следовательно, среднее расстояние между молекулами воздуха в комнате значительно больше среднего расстояния между молекулами воды.

Задача 4. Оцените среднее расстояние между молекулами воздуха в вашей комнате, воспользовавшись результатом решения задачи 3.

Решение.

На каждую молекулу воздуха в комнате в среднем приходится объём:

$$v = \frac{V}{N} \approx \frac{10^6}{2,5 \cdot 10^{25}} \approx 40 \cdot 10^{-21} (\text{см}^3).$$

Таким образом, если считать, что молекулы воздуха распределены равномерно по объёму комнаты, то каждая из них находится как бы в центре кубика объёмом $v \approx 40 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3$. При помощи калькулятора найдём, что ребро куба, имеющего объём $40 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3$, равно $3,42 \cdot 10^{-7} \text{ см}$. Следовательно, среднее расстояние между молекулами воздуха в вашей комнате примерно равно $3,42 \cdot 10^{-7} \text{ см}$, или 3,42 нм.

Ответ: среднее расстояние между молекулами воздуха в комнате примерно равно 3,42 нм.

Таким образом, средние расстояния между молекулами воздуха в комнате существенно больше размеров самих молекул.

Выполнив упражнения этого параграфа, вы узнаете, что в твёрдых телах средние расстояния между атомами (молекулами) примерно такие же, как и в жидкостях, т. е. близки к размерам самих атомов (молекул).

Упражнения

- 1 Капля масла объёмом $V = 10^{-5}$ см³ растекается на поверхности воды в пятно площадью примерно $S = 50$ см². Оцените толщину слоя масла и сделайте заключение о размерах молекул этого масла.
 - 2 Сколько атомов содержится в куске меди объёмом $V = 1$ см³, если плотность меди равна 9 г/см³? Оцените среднее расстояние между атомами меди.
 - 3 Плотность льда $\rho = 0,9$ г/см³. Оцените среднее расстояние между молекулами в замёрзшей воде. Сравните полученный результат с результатом задачи 2, решённой в этом параграфе.
 - 4 Плотность паров воды в парилке русской бани $\rho = 0,35$ кг/м³. Оцените количество молекул воды в 1 м³ водяного пара. Рас считайте среднее расстояние между молекулами воды в парилке. Сравните полученный результат с результатами из предыдущей задачи.
- *5** Считая, что воздух в комнате состоит на 78 % из молекул азота и на 22 % из молекул кислорода, докажите, что средняя масса молекулы воздуха примерно равна 29 а. е. м.
- *6** За какое время могли бы пролететь через отверстие все молекулы, содержащиеся в 1 см³ воздуха в вашем классе, если через это отверстие будет пролетать миллион молекул в секунду? Считайте, что плотность воздуха в классе $\rho = 1,2$ кг/м³.

§ 4 Движение молекул

Ранее, в § 2, говорилось, что молекулы любого вещества движутся друг относительно друга. На первый взгляд это утверждение противоречит тому, что мы наблюдаем в быту. Например, вода в стакане, стоящем на столе в комнате, представляется нам неподвижной. Мы не ощущаем и движения воздуха в комнате, если её двери и окна плотно закрыты. Однако утверждение о движении молекул друг относительно друга в веществе экспериментально доказано и не вызывает никаких сомнений. Как же учёные установили это?

Вы наверняка много раз видели, как «роятся» в солнечных лучах пылинки в комнате даже тогда, когда никакого движения воздуха нет. Пылинки беспорядочно перемещаются в разные стороны, неожиданно изменяя направление своего движения. Плотность вещества этих пылинок значи-

тельно больше плотности воздуха. Согласно законам механики Ньютона они должны были бы упасть на пол под действием силы тяжести. Однако этого не происходит. Более того, некоторые из пылинок время от времени смещаются вверх. Создаётся впечатление, что пылинки представляют собой живые организмы, способные летать.

Аналогичные явления наблюдаются и для малых частиц (размером около 10^{-6} м), взвешенных в жидкости. Хаотическое движение таких частиц в воде впервые описал английский ботаник Роберт Броун в 1827 г. Он наблюдал в микроскоп беспорядочное движение спор плауна (цветочной пыльцы) в капельке воды. С тех пор подобное движение стали называть *броуновским движением*, а совершающие такое движение частицы — *броуновскими частицами*.

! Броуновское движение представляет собой хаотическое движение очень мелких частиц в жидкости или в воздухе.

В чём же причина хаотического движения броуновских частиц? Какие силы препятствуют их падению, заставляя то и дело изменять направление своего движения, а иногда даже двигаться вверх?

Эти вопросы заинтересовали многих физиков, и исследованием такого движения начали заниматься учёные многих стран. Теория броуновского движения была разработана в начале XX в. Альбертом Эйнштейном (1879–1955) и независимо от него польским учёным Марианом Смолуховским (1872–1917). Французский физик Жан Перрен (1870–1942) экспериментально установил, что *темп (скорость) хаотического движения броуновских частиц при неизменных внешних условиях в среднем не изменяется с течением времени*. Этот вывод кажется парадоксальным. Действительно, во-первых, со стороны жидкости на движущееся в ней тело действуют силы сопротивления, препятствующие его движению. Поэтому движение частиц в жидкости должно было бы замедляться с течением времени. Во-вторых, плотность частиц больше плотности жидкости. Поэтому, как мы уже говорили, под действием силы тяжести они должны были бы опуститься на дно сосуда. Однако с броуновскими частицами ни то ни другое не происходит.

Такое «странное» поведение броуновских частиц объясняется тем, что эти частицы непрерывно испытывают с разных сторон удары молекул окружающей среды. Значит, молекулы среды непрерывно движутся! Число и сила ударов молекул о броуновскую частицу с разных сторон имеют *случайный* характер. Из-за этого то и дело изменяются модуль и направление скорости движения броуновской частицы. Таким образом, *хаотическое движение броуновской частицы является результатом её взаимодействия с хаотически движущимися молекулами окружающей среды*.

! Результаты исследования броуновского движения доказывают: молекулы среды непрерывно хаотически движутся друг относительно друга.

Отметим особо, что при этом сама среда (вода в стакане, воздух в комнате и т. п.) в целом остаётся неподвижной.

Теперь, когда нам стали понятны причины «странных» поведения броуновских частиц, мы можем сделать очень важный вывод: при неизменных внешних условиях остаётся неизменным темп хаотического движения броуновской частицы, а это свидетельствует о неизменном темпе хаотического движения молекул среды.

А что произойдёт, если изменить внешние условия? Например, нагреть среду. Наблюдая за движением броуновских частиц, Перрен экспериментально установил, что *температура хаотического движения броуновских частиц увеличивается при нагревании среды*. Следовательно, увеличивается и темп хаотического движения её молекул. Поэтому хаотическое движение молекул и атомов среды часто называют *тепловым движением*.

! Темп хаотического движения молекул среды увеличивается при её нагревании.

О том, что молекулы вещества, неподвижного в целом, совершают хаотическое движение друг относительно друга и темп этого движения возрастает по мере нагревания вещества, свидетельствует и такое явление, как *диффузия*.

Диффузией называют взаимное проникновение друг в друга соприкасающихся веществ вследствие теплового движения частиц этих веществ.

При диффузии происходит перемешивание веществ.

К примеру, откроем в комнате флакон с духами. Через некоторое время в комнате будет ощущаться запах духов, даже если движения воздуха не происходит. Точно так же можно почувствовать и запах нафталина, если его крупинки положить на ковёр. Эксперименты показывают, что в нагретой комнате (например, в жаркую погоду) запах распространяется быстрее, чем в холодной. Это подтверждает то, что в нагретой среде хаотическое (тепловое) движение молекул происходит более интенсивно. Подчеркнём ещё раз, что среда при этом в целом может оставаться неподвижной.

Диффузия наблюдается также и в жидкостях. Но в жидкостях она происходит значительно медленнее, чем в газах. Нальём в мензурку небольшое количество раствора медного купороса. Затем туда же аккуратно нальём чи-

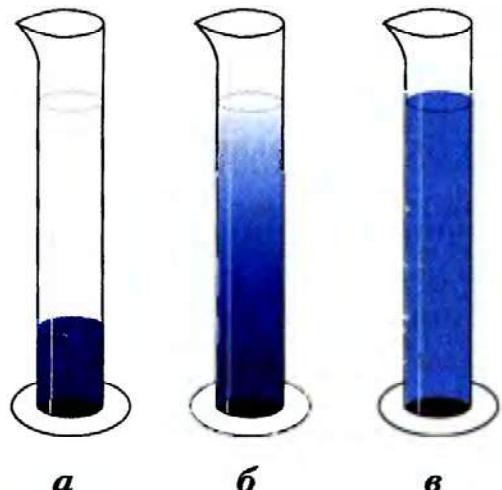


Рис. 4 Диффузия медного купороса в воде

стую воду, имеющую меньшую плотность, так, чтобы между водой и раствором медного купороса была видна резкая граница (рис. 4, а). Через несколько часов граница между водой и раствором медного купороса станет размытой (рис. 4, б). По прошествии нескольких суток (рис. 4, в) жидкость в мензурке будет равномерно окрашена в бледно-голубой цвет. Это происходит потому, что молекулы находящихся в сосуде веществ совершают непрерывное хаотическое движение. При этом молекулы одного вещества проникают в промежутки между

молекулами другого вещества. В конце концов молекулы обоих веществ практически равномерно распределяются по всему объёму.

В твёрдых телах диффузия протекает ещё медленнее, чем в жидкостях. Если зачищенные свинцовую и золотую пластинки сильно сжать, то при комнатной температуре за пять лет золото и свинец проникнут друг в друга примерно на один миллиметр. Эксперимент показывает, что даже при небольшом нагревании этих металлов скорость их диффузии увеличивается, соответственно при охлаждении — уменьшается.

! Таким образом, диффузия во всех случаях ускоряется при нагревании. Это объясняется увеличением по мере нагревания темпа хаотического движения молекул и атомов.

Явление диффузии играет огромную роль в природе. Именно благодаря диффузии поддерживается однородный состав атмосферного воздуха вблизи поверхности Земли, кислород через лёгкие поступает в кровь человека. Диффузия растворов разных веществ способствует питанию растений. В последние десятилетия диффузия широко применяется в технике, особенно при изготовлении полупроводниковых элементов в современных устройствах (компьютерах, мобильных телефонах, телевизорах и т. п.).

Итоги

Молекулы любого вещества непрерывно хаотически движутся друг относительно друга. Это подтверждается движением броуновских частиц и диффузией.

Темп хаотического движения броуновских частиц при неизменных внешних условиях в среднем не изменяется с течением времени. При нагревании он увеличивается. Это объясняется увеличением темпа хаотического движения молекул среды при её нагревании.

Хаотическое движение молекул и атомов среды называют тепловым движением.

Диффузией называют взаимное проникновение друг в друга соприкасающихся веществ вследствие теплового движения частиц этих веществ.

Скорость диффузии увеличивается при нагревании.

В жидкостях диффузия происходит медленнее, чем в газах, но быстрее, чем в твёрдых телах.

Вопросы

1. Какие экспериментальные данные подтверждают гипотезу о непрерывном хаотическом движении молекул?
2. Что такое броуновское движение?
3. Что называют диффузией?
4. Как изменяется темп хаотического движения молекул при нагревании (охлаждении) среды? Какие эксперименты подтверждают это?
5. Почему хаотическое движение молекул часто называют тепловым движением?
6. Как различаются скорости диффузии в газах, жидкостях и твёрдых телах?
7. Как изменится скорость диффузии в мензурке с медным купоросом (рис. 4, а), если её поместить в холодильник, выставить на улицу в жаркий летний день? Объясните различия с точки зрения молекулярной теории.
8. Какова роль диффузии в природе? Приведите примеры природных процессов, имеющих в основе диффузию.

Упражнения

1. Сделайте описание характера движения броуновских частиц по результатам работы с видеомоделью на сайте http://ru.wikipedia.org/wiki/Броуновское_движение.

 2 | Запланируйте и проведите эксперимент по изучению зависимости скорости диффузии от температуры веществ. Используйте для опыта несколько пакетиков с чаем для заварки, холодную, тёплую и горячую воду. Опишите оборудование, условия и результаты эксперимента. Сформулируйте выводы и сделайте сообщение в классе.

§ 5 Взаимодействие молекул

Силы взаимного притяжения и отталкивания

В предыдущем параграфе мы выяснили, что беспорядочное движение броуновских частиц обусловлено действием молекул окружающей среды. Понятно, что молекулы взаимодействуют не только с находящимися среди них частицами, но и друг с другом. Прежде чем продолжить изучение свойств веществ, исследуем, как взаимодействуют молекулы.

Посмотрите на учебник, ручку, карандаш, лежащие на вашем столе. Если к ним не прикладывать сил, то они не деформируются. Следовательно, при отсутствии внешних усилий и неизменных внешних условиях размеры и форма тел не изменяются. Значит, не изменяются и средние расстояния между молекулами в веществах, из которых состоят эти тела. Создаётся впечатление, что при некотором среднем расстоянии r_0 между молекулами вещества силы взаимодействия внешне никак не проявляются. Можно предположить, что либо этих сил нет (т. е. молекулы не взаимодействуют), либо при таком расстоянии между молекулами силы взаимодействия каким-то образом скомпенсированы. Попробуем разобраться в этом.

Допустим, что силы взаимодействия между молекулами вещества отсутствуют. Тогда при малейшем внешнем воздействии любое тело должно рассыпаться на составляющие его частицы. Однако этого не происходит. Более того, если мы попытаемся изменить расстояния между молекулами какого-либо тела, например разорвать нитку или растянуть металлический стержень, то почувствуем, что для этого потребуется приложить значительные усилия. Следовательно, силы взаимодействия между частицами нити (или стержня) препятствуют нашим попыткам увеличить расстояние между ними. Значит, *при увеличении расстояния между молекулами вещества больше некоторого значения r_0 между этими молекулами проявляются силы взаимного притяжения*.

Сила взаимного притяжения двух соседних молекул в растягиваемом теле очень мала. Однако в каждом сечении нити (или стержня) число соседних взаимодействующих молекул огромно. Чтобы преодолеть суммарную силу их взаимного притяжения (т. е. растянуть тело или даже разорвать его), необходимы достаточно большие внешние силы.

! Таким образом, между молекулами существуют силы взаимного притяжения.

Этим и объясняется тот факт, что окружающие нас тела не распадаются на отдельные молекулы и атомы.

В разных веществах силы взаимного притяжения между молекулами различны. Поэтому разные вещества имеют разную упругость и прочность. Это хорошо видно из рис. 5. Чтобы растянуть (деформировать) стержни из различных веществ на одну и ту же величину, к ним нужно приложить разные силы.

Силы межмолекулярного притяжения достигают значительной величины только на расстояниях, сравнимых с размерами молекул. Например, при соединении двух кусков пластилина расстояние между их молекулами можно сделать достаточно малым. При этом проявляются силы взаимного притяжения между молекулами обоих кусков. Поэтому куски слипаются. Анало-

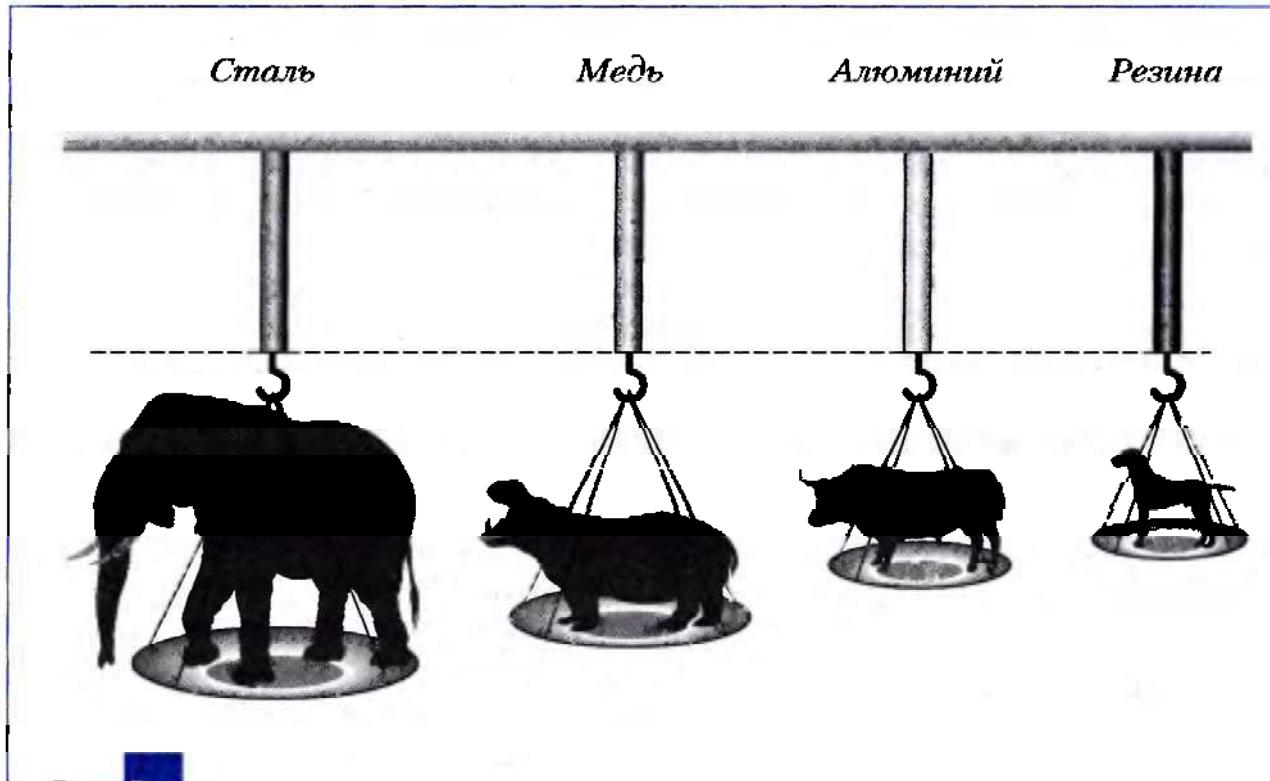


Рис. 5 Стержни из разных веществ увеличили свою длину примерно на 1 % под действием веса животных с разными массами



Рис. 6

Два свинцовых цилиндра, плотно прижатые друг к другу свежими ровными срезами, выдерживают большое усилие на разрыв

гичным образом объясняется слияние двух соприкоснувшихся капель воды и сцепление двух свинцовых цилиндров, плотно прижатых друг к другу (рис. 6).

Однако если мы попытаемся прижать друг к другу два осколка только что разбитого стекла, то они не слипнутся. Почему? Из-за неровностей краёв осколков нам не удастся сблизить большое число их молекул. Суммарная сила взаимного притяжения молекул на краях сжимаемых осколков будет недостаточна для их слипания. Если же нагреть края этих осколков до размягчения и сжать их, то они слипнутся и станут единым целым. Это означает, что нам удалось сблизить достаточно большое число молекул на границах осколков. Подобное же явление происходит при сварке и спайивании металлов, а также при склеивании предметов.

При уменьшении расстояния между двумя молекулами силы их взаимного притяжения увеличиваются. Притяжение двух молекул на расстоянии напоминает знакомое вам притяжение друг к другу двух магнитов. Чем меньше расстояние между ними, тем больше сила их притяжения.

А являются ли силы взаимного притяжения единственными силами взаимодействия молекул? В § 3 мы установили, что среднее расстояние между молекулами в твёрдых телах и жидкостях сравнимо с размерами самих молекул. Почему же под действием сил взаимного притяжения молекулы не сближаются на ещё меньшие расстояния? Что компенсирует эти силы и заставляет молекулы держаться друг от друга на определённом расстоянии r_0 ?

Оказывается, между молекулами в веществе, помимо сил взаимного притяжения, существуют и силы взаимного отталкивания. Действительно, попробуем сжать металлический стержень (рис. 7). Мы почувствуем сопротивление с его стороны. Следовательно, *при уменьше-*

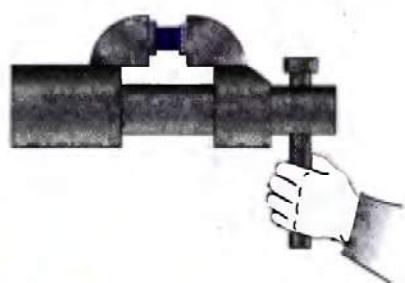


Рис. 7

Силы взаимного отталкивания между молекулами препятствуют сжатию металлического стержня

ии расстояния между молекулами вещества меньше некоторого значения r_0 между этими молекулами становятся преобладающими силы взаимного отталкивания.

! Силы взаимного отталкивания компенсируют действие сил взаимного притяжения, когда молекулы вещества находятся друг от друга на расстоянии r_0 .

Мы установили, что между молекулами существуют как силы взаимного притяжения, так и силы отталкивания. При некотором определённом расстоянии r_0 между молекулами эти силы компенсируют друг друга (рис. 8). Если расстояние между молекулами по каким-либо причинам становится меньше r_0 (тело сжимают), то силы взаимного отталкивания превышают силы притяжения. В результате молекулы отталкиваются друг от друга. Напротив, если расстояние между молекулами по каким-либо причинам становится больше r_0 (тело растягивают), то силы взаимного притяжения превышают силы отталкивания и молекулы притягиваются друг к другу. Этим объясняется то, что *при отсутствии внешних воздействий тела не изменяют своей формы, а при попытках деформировать их (например, растянуть или сжать) они сопротивляются внешнему воздействию*.

Если расстояние между молекулами становится много больше r_0 , то силы взаимодействия между ними становятся недостаточными для сохранения целостности тела. В этом случае происходит разрушение тела (разрыв нити, разлом стержня и т. п.).

Чтобы пояснить характер взаимодействия двух молекул (преобладание сил взаимного притяжения или отталкивания) в зависимости от расстояния между ними, воспользуемся графиком, изображённым на рис. 9. На рисунке видно, как меняются значения силы отталкивания F_o и силы притяжения F_n в зависимости от расстояния между молекулами. Суммарная сила взаимодействия \vec{F} является результатом сложения этих двух

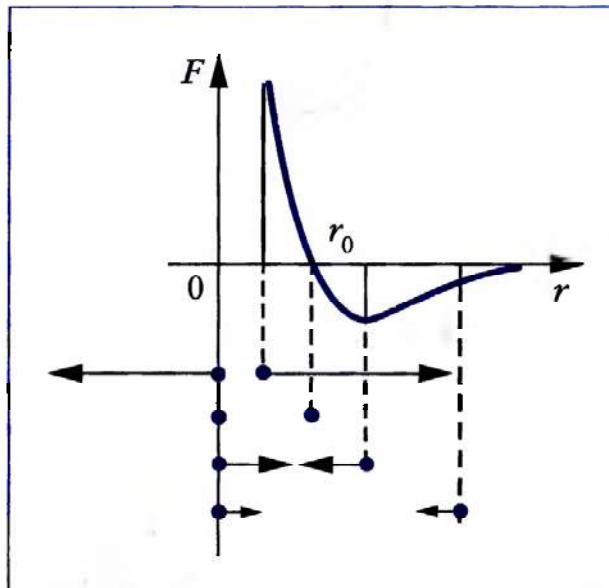


Рис. 8

Зависимость значения силы взаимодействия между молекулами от расстояния. При $r < r_0$ молекулы отталкиваются ($F > 0$), при $r > r_0$ — притягиваются ($F < 0$)

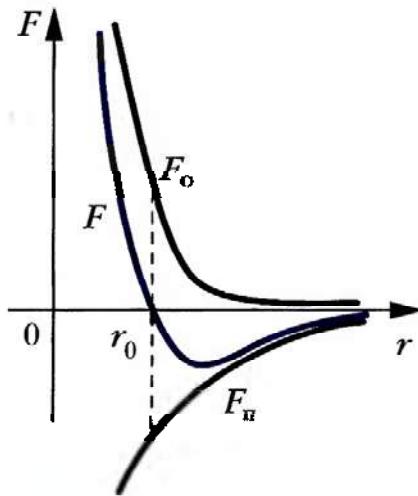


Рис. 9

Сила взаимодействия между двумя молекулами вещества является результатом сложения силы отталкивания F_o и силы притяжения F_n между ними

сил. Обратим особое внимание на то, что модуль F_o силы взаимного отталкивания нарастает при уменьшении расстояния r значительно быстрее, чем модуль F_n силы взаимного притяжения. Поэтому модуль F суммарной силы взаимодействия двух молекул становится равным нулю при определённом расстоянии r_0 между ними. Таким образом, расстояние r_0 между центрами атомов соответствует положению, при котором силы притяжения и отталкивания между этими атомами скомпенсированы. Для атомов различных веществ это расстояние различно. Например, для двух атомов водорода расстояние $r_0 \approx 0,074$ нм, а для двух атомов калия расстояние $r_0 \approx 0,39$ нм.

Взаимодействие молекул разных веществ

Мы с вами исследовали, как взаимодействуют между собой молекулы одного и того же вещества. Оказывается, между собой могут взаимодействовать и молекулы разных веществ.

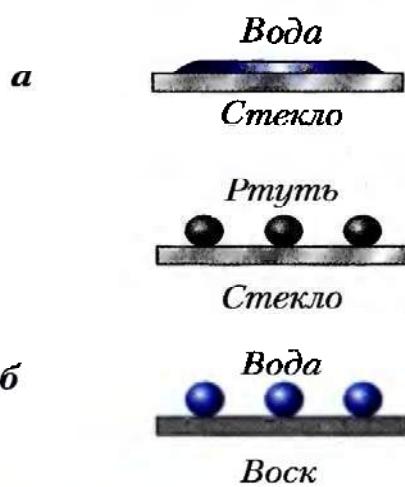


Рис. 10

Явления смачивания и несмачивания жидкостью поверхности твёрдого тела

Приведём в контакт два тела из разных веществ. Например, разольём жидкость по поверхности твёрдого тела. В этом случае на молекулу жидкости, находящуюся на границе раздела двух сред, будут действовать силы двух видов. Во-первых, силы со стороны соседних молекул жидкости. Во-вторых, силы со стороны близко расположенных молекул твёрдого тела. Эти силы будут «конкурировать» между собой. При этом возможны два принципиально разных случая.

Если силы взаимного притяжения между молекулами жидкости значительно меньше сил их притяжения к молекулам твёрдого тела, то молекулы жидкости «расстаются» друг с другом, разбегаясь по поверхности твёрдого тела. В этом случае жидкость растекается по поверхности тела, образуя на ней тонкую плёнку (рис. 10, а). Явление растекания жидкости по поверхности твёрдого тела называют **смачиванием**.

Напротив, если силы взаимного притяжения между молекулами жидкости значительно больше сил их притяжения к молекулам поверхности, то молекулы жидкости как бы «не желают» расставаться друг с другом. Поэтому растекания жидкости по поверхности не происходит и она собирается в капельки (рис. 10, б). Такая картина наблюдается, например, при попадании капель воды на поверхность, натёртую воском или смазанную жиром, а также с каплями ртути на стекле. В этом случае говорят, что жидкость не смачивает данное твёрдое вещество.

! Если молекулы жидкости притягиваются друг к другу слабее, чем к молекулам твёрдого тела, то жидкость смачивает поверхность твёрдого тела. Если же молекулы жидкости притягиваются друг к другу сильнее, чем к молекулам твёрдого тела, то жидкость не смачивает твёрдое тело.

Явления смачивания и несмачивания встречаются очень часто. Например, мы не можем вымыть водой жирные руки. Вода будет скатываться с них каплями, и для удаления жировой плёнки нам понадобятся специальные моющие средства. Водоплавающие птицы, наоборот, имеют жировые железы, благодаря которым жир смазывает их оперение. В результате оно не смачивается водой (рис. 11).

С явлением смачивания связаны и капиллярные явления, которые можно наблюдать в узких трубках. Такие трубки называют **капиллярами**. Подъём воды в капиллярах объясняется тем, что вода смачивает стекло (рис. 12, а). При этом поверхность воды в капилляре становится вогнутой. Если же жидкость



Рис. 11

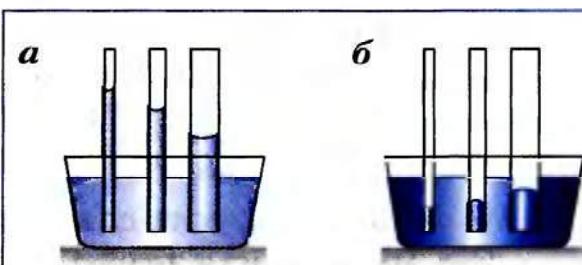


Рис. 12

Подъём или опускание жидкости в капилляре происходит в результате смачивания (а) или несмачивания (б) жидкостью поверхности трубы

не смачивает поверхность, то силы взаимодействия между молекулами стекла и жидкости меньше, чем между молекулами жидкости. В этом случае наблюдается опускание жидкости в капилляре (рис. 12, б), причём её поверхность в капилляре становится выпуклой.

Итоги

Между молекулами в веществе существуют как силы взаимного притяжения, так и силы отталкивания.

При некотором определённом расстоянии r_0 между молекулами эти силы компенсируют друг друга.

Если расстояние между молекулами меньше r_0 , то силы взаимного отталкивания превышают силы притяжения. В результате молекулы отталкиваются друг от друга. Если расстояние между молекулами больше r_0 , то силы взаимного притяжения превышают силы отталкивания и молекулы притягиваются друг к другу.

При отсутствии внешних воздействий твёрдые тела не изменяют свою форму, а при попытках деформировать их (например, растянуть или сжать) они сопротивляются.

Если расстояния между молекулами становятся много больше r_0 , то силы взаимного притяжения между ними становятся недостаточными для сохранения целостности тела. В этом случае происходит его разрушение.

Для разных веществ силы взаимного притяжения и отталкивания различны.

Явление растекания жидкости по поверхности твёрдого тела называют *смачиванием*. Это явление наблюдается, если силы взаимного притяжения между молекулами жидкости значительно меньше сил их притяжения к молекулам поверхности тела.

Напротив, если силы взаимного притяжения между молекулами жидкости значительно больше сил их притяжения к молекулам поверхности твёрдого тела, то растекания жидкости не происходит и она собирается в капельки. В этом случае говорят, что жидкость *не смачивает* данное вещество.

Вопросы

- 1 В каком случае молекулы вещества притягиваются друг к другу, отталкиваются друг от друга?
- 2 Почему при отсутствии заметных внешних усилий размеры и форма окружающих нас твёрдых тел не изменяются?
- 3 Докажите, что между молекулами существуют силы взаимного притяжения.
- 4 В каких экспериментах проявляются силы взаимного притяжения между молекулами?
- 5 В каких экспериментах проявляются силы взаимного отталкивания между молекулами?
- 6 Почему происходит слияние двух соприкоснувшихся капель воды?
- 7 Почему не слипаются два осколка только что разбитого стекла? Что надо сделать, чтобы они слиплись?
- 8 Объясните с точки зрения молекулярной теории, почему капля воды растекается по стеклу и не растекается по воску.

Задание

- ✓ Подготовьте реферат о роли явлений смачивания и несмачивания в природе.

§ 6

Агрегатные состояния вещества

Вы наверняка знаете, что одно и то же вещество в зависимости от внешних условий может быть газообразным, жидким и твёрдым. Так, вода в стакане в вашей комнате находится в жидком состоянии. Если вынести этот стакан на улицу зимой, то вода замёрзнет и превратится в лёд. Если же оставить этот стакан в комнате, то через некоторое время вся вода испарится — перейдёт в газообразное состояние. При этом воздух в комнате станет более влажным.

! Любое вещество в зависимости от внешних условий может находиться в трёх состояниях: газообразном, жидком и твёрдом. Эти состояния называют *агрегатными состояниями* вещества.

Существование трёх агрегатных состояний объясняется различием сил взаимодействия и характера движения молекул в веществе при различных внешних условиях.

Из решения задач § 3 вы знаете, что среднее расстояние между молекулами в воздухе значительно больше размеров молекул. Из-за этого силы взаимного притяжения между ними малы. Молекула газа почти не притягивается к другим молекулам. Поэтому она движется практически прямолинейно, пока не столкнётся с другой молекулой газа или стенкой сосуда, в котором находится газ. При этих столкновениях проявляются силы взаимного отталкивания.

Молекулы газа движутся хаотически и заполняют весь предоставленный им объём. По этой причине вещество, находящееся в газообразном состоянии, не имеет определённой формы и объёма.

! Вещество в газообразном состоянии не имеет определённой формы и объёма. Газ полностью заполняет весь предоставленный ему объём.

В твёрдых телах молекулы и атомы вещества находятся друг от друга в среднем на расстояниях r_0 , близких к размерам самих молекул. Силы взаимного притяжения и отталкивания между молекулами при этом скомпенсированы. При небольшом увеличении этого расстояния проявляются значительные силы взаимного притяжения. Твёрдые тела сопротивляются внешним воздействиям по их растяжению. При уменьшении расстояния между молекулами меньше r_0 между ними проявляются силы отталкивания. Как следствие, твёрдые тела практически не сжимаемы.

! Таким образом, твёрдые тела сохраняют свою форму и размеры до тех пор, пока к ним не прикладывают значительные внешние усилия.

Молекулы (атомы) в твёрдых телах располагаются в среднем во вполне конкретных местах в определённом порядке. Этот порядок зависит от строения молекул (атомов). Во многих веществах такой порядок в размещении молекул (атомов) образует повторяющуюся структуру, размеры которой в сотни тысяч раз больше среднего расстояния между соседними атомами этого вещества. Такую структуру называют *кристаллической решёткой*. Сами атомы располагаются в узлах кристаллической решётки. Твёрдые тела, имеющие единую кристаллическую решётку, называют *моноокристаллами*.

На рис. 13 показано, как располагаются атомы натрия и хлора в небольшой части кристалла поваренной соли. Порядок расположения атомов и молекул в кристалле определяет внешнюю форму этого кристалла (рис. 14).

Существуют и другие вещества в твёрдом состоянии, у которых порядок в расположении молекул и атомов прослеживается в значительно меньшей степени (повторяющаяся структура имеет размеры от десятков до тысяч среднего расстояния между соседними частицами). Такие веще-

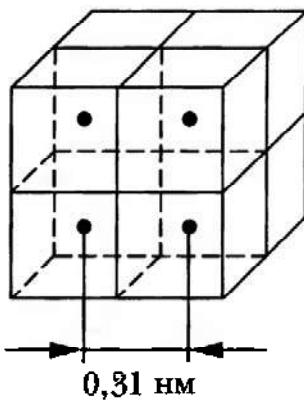


Рис. 13

Атомы натрия и хлора в кристалле поваренной соли образуют кубическую решётку

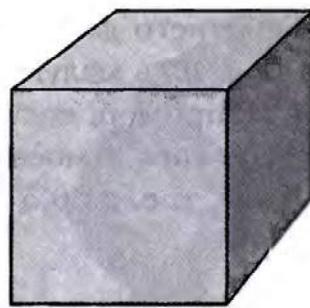


Рис. 14

Форма кристалла поваренной соли

ства называют *аморфными*. К ним относятся, например, стекло, янтарь, воск, пластилин. Форма тел из аморфных веществ с течением времени может изменяться под действием даже небольших внешних сил. Это явление называют *текучестью*.

Молекулы (атомы) в твёрдом веществе также движутся. Однако значительные силы взаимодействия с соседями не позволяют молекуле (атому) существенно удалиться от своего равновесного положения. Поэтому молекула может совершать лишь хаотические колебания вблизи этого положения.



В отличие от твёрдых тел жидкости не имеют упорядоченной структуры. Силы взаимодействия между молекулами жидкости меньше, чем в твёрдом веществе. Молекулы жидкости не имеют конкретного места и могут часто менять своих соседей.

Это объясняет большую текучесть жидкости, она легко меняет свою форму.

В то же время силы взаимного притяжения между молекулами жидкости достаточны, чтобы не позволить молекулам «разбежаться» друг от друга на большие расстояния, как это происходит в газах. Поэтому, *как и твёрдые тела, жидкости имеют определённый объём*.

В среднем расстояние между молекулами жидкости достаточно мало. Поэтому при попытке уменьшить объём жидкости между её молекулами



На этом свойстве аморфных веществ основан процесс изготовления изделий из стекла. Для того чтобы придать изделию необходимую форму, стекло предварительно разогревают в печи.

Оконное стекло даже в холодном состоянии обладает текучестью. Находясь в вертикальном положении, за долгое время (десятилетия) оно приобретает незначительное утолщение в нижней части.

проявляются очень большие силы взаимного отталкивания. Так, при увеличении внешнего давления на жидкость до сотен атмосфер её объём изменяется на очень малую величину — десятые, а иногда и тысячные доли процента. Например, если 1 кг воды подвергнуть давлению в 100 раз большему нормального атмосферного давления, то её объём уменьшится всего лишь на 5 см^3 , т. е. на 0,5 % от начального объёма.

Итоги

Вещество в зависимости от внешних условий может быть газообразным, жидким и твёрдым. Эти состояния называют *агрегатными состояниями* вещества.

Молекулы газа находятся друг от друга в среднем на расстояниях значительно больших размеров молекул. Вещество, находящееся в газообразном состоянии, не имеет определённой формы и объёма.

Молекулы твёрдого вещества находятся друг от друга на расстояниях r_0 , близких к размерам самих молекул. Они располагаются в среднем во вполне конкретных местах, совершая относительно них хаотические колебания.

Если повторяющаяся структура в размещении молекул (атомов) наблюдается на больших расстояниях (в сотни тысяч раз больше среднего расстояния между молекулами), то такие вещества называют *кристаллами*. Если повторяющаяся структура в расположении молекул (атомов) наблюдается на малых расстояниях (от десятков до тысяч среднего расстояния между молекулами), то такие вещества называют *аморфными*.

Молекулы жидкости не имеют конкретного места и могут часто менять своих соседей. Поэтому жидкости легко меняют свою форму, но сохраняют свой объём.

Вопросы

- 1 Какие агрегатные состояния вещества вы знаете?
- 2 Как движутся молекулы (атомы) в газах, жидкостях и твёрдых телах?
- 3 Опишите взаимодействие молекул и атомов в газах, жидкостях и твёрдых телах.
- 4 Что такое кристалл? Чем отличаются кристаллические вещества от аморфных?

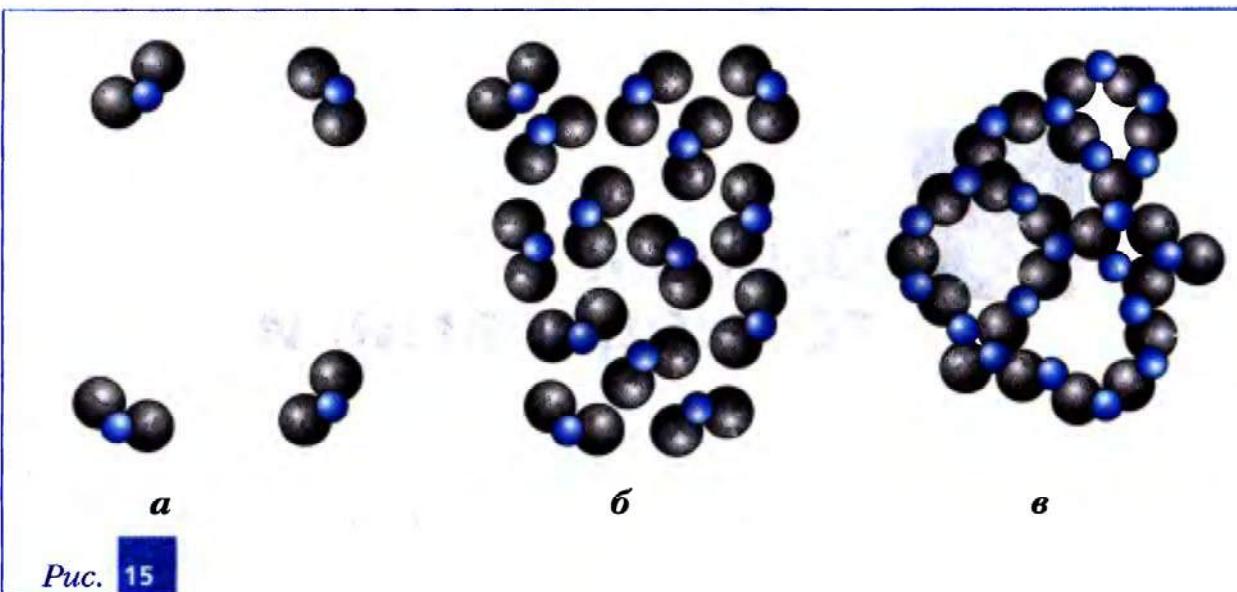


Рис. 15

- 5** Почему явление диффузии в твёрдых телах протекает существенно медленнее, чем в жидкостях, а тем более в газах?
- *6** Почему при нагревании все вещества обычно увеличивают свой объём?
- *7** На рис. 15 схематически показано взаимное расположение молекул воды, находящейся в газообразном (а), жидком (б) и твёрдом (в) состояниях. Объясните, почему плотность водяного пара меньше, чем у льда, а плотность льда меньше плотности воды. Обратите внимание, что в кристаллах льда атомы водорода служат связующими звенями между соседними атомами кислорода. Поэтому в кристаллах льда выделить отдельную молекулу невозможно.

Задания

- 1** Подготовьте реферат о современной классификации агрегатных состояний вещества, используя при подготовке материалы энциклопедий, интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Агрегатные_состояния. При подготовке рефератов, сообщений используйте сведения из различных источников, выполняйте их сравнение, анализ информации и её проверку.
- 2** Сформулируйте и обоснуйте гипотезу о причинах различия скоростей диффузии в газах, жидкостях и твёрдых телах, исходя из моделей взаимодействия молекул (атомов) веществ. Сделайте сообщение в классе.

Глава

2

Основы термодинамики

В предыдущей главе при изучении строения вещества вы узнали, что любое из окружающих нас тел представляет собой *систему, состоящую из огромного числа молекул (атомов)*.

Частицы, из которых состоит такая система, непрерывно хаотически движутся и взаимодействуют друг с другом. Следовательно, эта система обладает энергией. Кроме того, частицы системы могут взаимодействовать с внешними телами, не входящими в рассматриваемую систему. В результате этих взаимодействий энергия системы может изменяться. Изучению свойств подобных систем посвящён специальный раздел физики – термодинамика. Объект её исследования – термодинамические системы.

Совокупность очень большого числа частиц называют термодинамической системой.

Для описания свойств термодинамических систем используют разные физические величины: давление, объём, массу, температуру и др. Их называют *термодинамическими параметрами*. Значения этих параметров можно определить, используя различные физические приборы.

Отметим особо, что все изучаемые в данной главе явления мы будем рассматривать в инерциальной системе отсчёта, в которой изучаемое тело (термодинамическая система) поконится как целое.

§ 7

Внутренняя энергия термодинамической системы

Изучая механику, мы рассматривали движение и взаимодействие тел. Для любой системы взаимодействующих точечных тел нами были введены два вида механической энергии: кинетическая и потенциальная.

Каждое движущееся тело (летящий камень, соскальзывающие с горы санки или едущий по дороге автомобиль) обладает кинетической энергией и поэтому способно, при торможении например, совершить работу. При этом кинетическая энергия такого тела численно равна работе, которую тело может совершить при торможении до полной остановки только за счёт изменения своей скорости.

Любая система, состоящая из двух или более взаимодействующих между собой частей, обладает потенциальной энергией. Эта энергия определяется взаимным расположением частей системы и силами их взаимодействия.

Например, деформированная пружина обладает потенциальной энергией, т. е. способна совершить работу при возвращении в недеформированное состояние (рис. 16). Система, состоящая из поднятого над поверхностью Земли камня и Земли, при опускании камня также способна совершить работу. Следовательно, и эта система обладает потенциальной энергией.

Таким образом, любая совокупность движущихся и взаимодействующих между собой точечных тел обладает, во-первых, кинетической энергией (равной сумме кинетических энергий всех этих тел), во-вторых, потенциальной энергией взаимодействия этих тел друг с другом.

В выбранной нами модели каждая молекула представляет собой маленький жёсткий шарик, имеющий массу. Будем считать, что каждая молекула является точечным телом. В этом случае любая термодинамическая система представляет собой совокупность огромного числа точечных тел (молекул или атомов). Эти молекулы непрерывно хаотически движутся друг относительно друга. Следовательно, даже когда тело покоится как целое, молекулы, из которых оно состоит, обладают кинетической энергией. Кроме того, эти молекулы взаимодействуют друг с другом. Поэтому термодинамическая система обладает не только кинетической, но и потенциальной энергией.

Сумму кинетических энергий хаотического движения всех молекул (атомов) и потенциальных энергий их взаимодействия друг с другом называют внутренней энергией термодинамической системы.

Если обозначить сумму кинетических энергий хаотического движения всех молекул через K , а сумму потенциальных энергий их взаимодействия

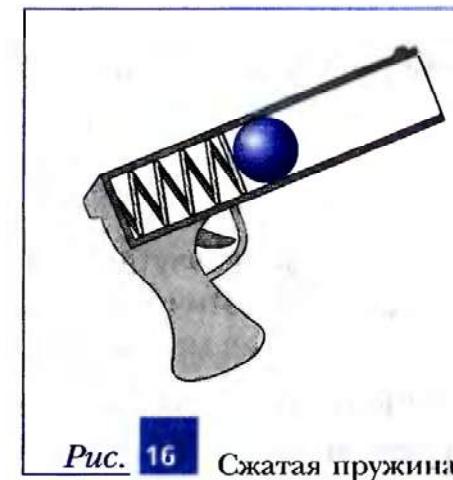


Рис. 16

Сжатая пружина способна совершить работу

друг с другом через P , то внутренняя энергия U термодинамической системы по определению равна:

$$U = K + P.$$

Обратим внимание на два очень важных момента.



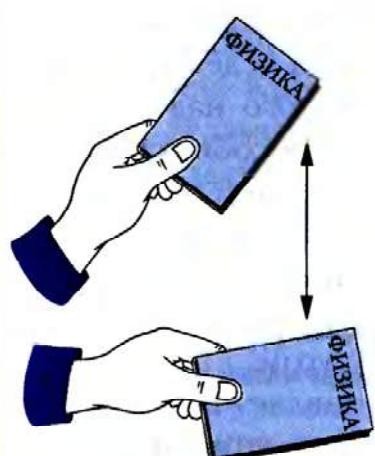
Во внутреннюю энергию термодинамической системы входит кинетическая энергия только хаотического (теплового) движения её молекул (атомов).

Поясним сказанное на примере. Представим себе, что все молекулы некоторого тела (термодинамической системы) движутся в одном направлении с одинаковыми скоростями. В этом случае всё тело как целое движется в том же направлении с той же скоростью, что и каждая его частица. Такое движение молекул не является хаотическим (тепловым). Поэтому

кинетическая энергия, обусловленная таким движением, не является частью внутренней энергии. Она не имеет никакого отношения к внутренней энергии тела. К внутренней энергии тела относят кинетическую энергию только хаотического (теплового) движения его молекул.

Возьмём, к примеру, учебник физики и начнём перемещать его, постоянно изменяя скорость его движения (рис. 17). Кинетическая энергия всего учебника как целого будет при этом изменяться. Однако внутренняя энергия учебника будет оставаться постоянной, так как суммарная кинетическая энергия хаотического движения его молекул не изменяется.

Рис. 17



Во внутреннюю энергию термодинамической системы (тела) входит потенциальная энергия взаимодействия молекул (атомов) этой системы только друг с другом.

Например, поднимая и опуская учебник, мы изменяем потенциальную энергию взаимодействия каждой из его молекул с Землёй. Однако потенциальная энергия взаимодействия молекул учебника *друг с другом* остаётся при этом неизменной. Следовательно, в этом случае остаётся неизменной и внутренняя энергия учебника.

Термодинамической системой называют совокупность очень большого числа частиц.

Частицы, из которых состоит термодинамическая система, совершают непрерывное хаотическое движение относительно друг друга и взаимодействуют как между собой, так и с внешними телами.

Сумму кинетических энергий хаотического движения всех молекул (атомов) и потенциальных энергий их взаимодействия друг с другом называют внутренней энергией термодинамической системы:

$$U = K + P.$$

Во внутреннюю энергию термодинамической системы входит кинетическая энергия *только хаотического (теплового) движения* её молекул (атомов). Кинетическая энергия, обусловленная движением термодинамической системы (тела) как целого, не входит во внутреннюю энергию этой системы.

Во внутреннюю энергию термодинамической системы входит потенциальная энергия взаимодействия молекул (атомов) этой системы *только друг с другом*. Потенциальная энергия взаимодействия молекул этой системы с другими, внешними, телами не входит во внутреннюю энергию рассматриваемой системы.

Вопросы

- 1 Какие виды механической энергии вы знаете?
- 2 Какую работу может совершить точечное тело только за счёт своей кинетической энергии?
- 3 Чем определяется потенциальная энергия системы, состоящей из взаимодействующих тел?
- 4 Что называют термодинамической системой?
- 5 Что называют внутренней энергией термодинамической системы?
- 6 Из каких энергий складывается внутренняя энергия тела?
- 7 Можно ли изменить внутреннюю энергию тела за счёт его поднятия над поверхностью Земли?

- 8** Изменяется ли внутренняя энергия тела, когда изменяют скорость его движения как целого?
- *9** Можно ли изменить внутреннюю энергию тела, деформируя его?
- *10** Будет ли изменяться (и если да, то как) внутренняя энергия тела при его нагревании и охлаждении?

Упражнения

- 1** Рассчитайте среднюю кинетическую энергию хаотического движения молекул кислорода и водорода в комнате, если известно, что средние значения модулей скоростей хаотического движения этих молекул равны соответственно $v_{O_2} = 500 \text{ м/с}$ и $v_{H_2} = 2000 \text{ м/с}$.
- *2** Оцените внутреннюю энергию воздуха, находящегося в комнате объёмом $V = 100 \text{ м}^3$. Плотность воздуха примите равной $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$, а среднее значение модуля скорости хаотического движения молекул $v = 500 \text{ м/с}$. При этом считайте, что молекулы воздуха практически не взаимодействуют друг с другом.
- 3** Проанализируйте, изменяется ли внутренняя энергия воздуха в салоне: а) взлетающего, б) летящего с постоянной скоростью, в) приземляющегося самолёта. Рассмотрите случаи: когда условия в салоне неизменны; когда в салоне по просьбе пассажиров включили обогрев. Сделайте сообщение в классе.

§ 8

Изменение внутренней энергии термодинамической системы в результате совершения работы

Каким же образом можно изменить внутреннюю энергию термодинамической системы? Оказывается, существуют только два принципиально различных способа сделать это! В этом параграфе мы рассмотрим один из этих способов.

Проведём простой эксперимент. Положим на край стола учебник и слегка ударим по нему рукой так, чтобы он начал двигаться по поверхности стола. Проехав по столу небольшое расстояние, учебник в результате тормозящего действия силы трения остановится.

Рассмотрим, как изменилась механическая энергия учебника. После удара учебник начал движение с некоторой скоростью. Следовательно, он обладал кинетической энергией. При движении скорость учебника и, соот-

всегда уменьшилась, его кинетическая энергия уменьшилась до нуля. Эта энергия была «съедена» работой силы трения учебника о стол. Но исчезла ли эта энергия бесследно? Может быть, она перешла в какую-то другую форму?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, проведём ещё один эксперимент. Положим тот же учебник на стол и, надавив на него сверху рукой, начнём двигать учебник по столу, как бы «втирая» его в поверхность (рис. 18). Если после нескольких минут такого упражнения вы прижмёте нижнюю сторону учебника к щеке, то почувствуете, что обложка нагрелась. Нагрелась при этом и поверхность стола. Что это означает?

При изучении явления диффузии и броуновского движения вы узнали, что при нагревании вещества увеличивается темп хаотического (теплового) движения молекул. Следовательно, при нагревании учебника и стола в процессе трения друг о друга увеличился темп хаотического движения молекул, из которых они состоят. Значит, увеличилась и кинетическая энергия хаотического движения этих молекул. Таким образом, работа силы трения учебника о стол привела к увеличению кинетической энергии хаотического (теплового) движения молекул учебника и стола.

■ Работа, совершенная над телом, привела к увеличению темпа хаотического (теплового) движения молекул, а следовательно, к увеличению кинетической энергии их хаотического движения.

Теперь становится понятным, что происходило в первом эксперименте. В процессе движения учебника по столу кинетическая энергия его движения как целого уменьшалась в результате работы силы трения. При этом увеличивалась кинетическая энергия хаотического (теплового) движения молекул учебника и стола. Другими словами, кинетическая энергия учебника как целого перешла в кинетическую энергию хаотического (теплового) движения молекул.

Рассмотрим ещё один пример. Вспомним, что происходит при забивании гвоздя в доску. После нескольких ударов молоток, гвоздь и доска нагреваются. Следовательно, в результате совершения работы увеличивается кинетическая энергия хаотического (теплового) движения молекул этих тел. Кроме того, гвоздь и доска заметно деформируются. Это означает, что изменяются расстояния между молекулами, из которых они состоят. Сле-

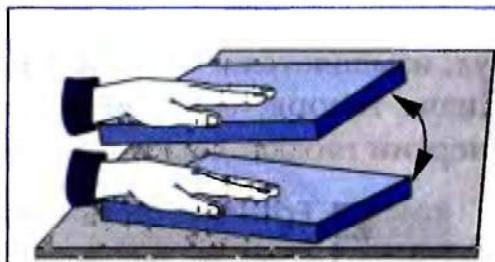


Рис. 18

При движении учебника по столу его нижняя поверхность и поверхность стола нагреваются

довательно, кроме кинетической энергии хаотически движущихся молекул, изменяется и потенциальная энергия их взаимодействия между собой. Иначе говоря, совершённая работа приводит к увеличению внутренней энергии гвоздя, доски и молотка.

! Если смотреть на тело (термодинамическую систему) из системы отсчёта, в которой оно покоится, то при совершении над ним работы его внутренняя энергия увеличивается ровно на величину этой работы.

Для того чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_k тела, надо к его начальной внутренней энергии U_0 прибавить работу, совершенную над этим телом (рис. 19). При этом обычно говорят, что *над телом была совершена положительная работа*. Напомним также, что работа рассчитывается в системе отсчёта, где тело покоится.

$$U_0 + A = U_k$$


Рис. 19 При совершении над телом работы конечная внутренняя энергия покоящегося тела больше начальной на величину совершенной работы A

Если *само тело* (термодинамическая система) в системе отсчёта, где оно покоится, *совершает положительную работу*, то его внутренняя энергия *уменьшается* на величину, равную этой работе (рис. 20). В этом случае часто говорят, что над телом была совершена отрицательная работа.

Например, пусть из стоящей на столе бутылки с газированной водой вылетает под давлением углекислого газа пробка и выливается часть воды. В этом случае термодинамическая система, состоящая из воды и газа в бутылке, совершает работу. В результате внутренняя энергия такой системы уменьшается. Можно убедиться, что при этом вода с газом охлаждаются.

Обычно принято оба рассмотренных нами случая записывать в виде одного уравнения:

$$U_k = U_0 + A,$$

$$U_0 - A = U_k$$



Рис. 20 При совершении покоящимся телом работы конечная внутренняя энергия тела меньше начальной на величину совершённой работы A

где A – работа, совершенная над телом (термодинамической системой). При этом если работа совершается над телом, то значение работы A в уравнении будет положительным. Если же работу совершает само тело, то значение работы A будет отрицательным.

Это правило называют *правилом знаков*.

Рассмотрим решения задач с использованием приведённых уравнений.

Задача 1. Кусок пластилина сжали с противоположных сторон двумя силами, модули которых равны $F = 1\text{ Н}$. В результате сжатия пластилин деформировался так, что его противоположные стороны сместились на $l = 1\text{ см}$ каждая. Определите изменение внутренней энергии куска пластилина.

Решение.

Каждая из двух сил совершила работу $A = F \cdot l$. Общая работа, совершенная над пластилином, равна $2A = 2F \cdot l$. Поэтому изменение внутренней энергии пластилина равно (см. рис. 19):

$$U_k - U_0 = 2F \cdot l = 2 \cdot 1 \cdot 10^{-2} = 20 (\text{мДж}).$$

Ответ: внутренняя энергия пластилина увеличилась на 20 мДж.

Задача 2. Пробка массой $m = 10\text{ г}$ вылетела из бутылки с газированной водой и поднялась на высоту $h = 30\text{ см}$. Оцените изменение внутренней энергии термодинамической системы (бутылки с газированной водой), произошедшее при выталкивании пробки.

Решение.

Газ в бутылке при выталкивании пробки совершил работу A над пробкой. В результате пробка приобрела кинетическую энергию K , которая в процессе подъёма пробки на высоту h полностью перешла в потенциаль-

ную энергию взаимодействия пробки с Землёй: $\Pi = m \cdot g \cdot h$, где $g = 10 \text{ м/с}^2$ — модуль ускорения свободного падения. Таким образом,

$$A = K = \Pi = m \cdot g \cdot h.$$

В результате совершённой газом работы A внутренняя энергия бутылки с газированной водой уменьшилась (см. рис. 20):

$$U_{\text{k}} - U_0 = -A = -m \cdot g \cdot h = -10 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 0,3 = -30 \text{ (мДж)}.$$

Ответ: внутренняя энергия бутылки с газированной водой уменьшилась на 30 мДж.

Задача 3. С высоты $h = 1 \text{ м}$ на свинцовую плиту падает гиря массой $m = 5 \text{ кг}$. После удара гиря остаётся неподвижно лежать на плите. Определите изменение внутренней энергии термодинамической системы, состоящей из гири и плиты.

Решение.

Потенциальная энергия взаимодействия гири с Землёй уменьшилась на величину $\Pi = m \cdot g \cdot h$. В процессе падения гири потенциальная энергия этой системы переходит в кинетическую энергию K гири. Поэтому

$$K = \Pi = m \cdot g \cdot h.$$

После удара гиря лежит неподвижно. Следовательно, при ударе гири о плиту силы неупругих деформаций совершают над термодинамической системой, состоящей из гири и плиты, работу A , численно равную этой кинетической энергии гири перед ударом: $A = K$. Поэтому изменение внутренней энергии системы (см. рис. 19):

$$U_{\text{k}} - U_0 = A = K = \Pi = m \cdot g \cdot h = 5 \cdot 10 \cdot 1 = 50 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: внутренняя энергия данной термодинамической системы увеличилась на 50 Дж.

Итоги

Внутреннюю энергию термодинамической системы можно изменить, совершив над ней механическую работу.

Чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_{k} тела при совершении над ним (или им самим) работы A в системе отсчёта, где тело поконится, надо к его начальной внутренней энергии U_0 прибавить эту работу:

$$U_{\text{k}} = U_0 + A.$$

При этом если работа совершается над телом, то значение работы A будет положительным. Если же работу совершают само тело, то значение работы A будет отрицательным. Это правило называют правилом знаков.

Вопросы

- 1 Какой способ изменения внутренней энергии термодинамической системы вы знаете?
- 2 Почему при многократном изгибании проволоки она нагревается?
- 3 Объясните, почему пластилин размягчается, если его разминать.
- *4 Древние люди добывали огонь за счёт трения одной сухой палки о другую. Объясните, почему удавалось таким способом получить огонь.
- 5 Сформулируйте правило знаков.

Упражнения

- 1 Определите изменение внутренней энергии термодинамической системы, состоящей из стола и скользившего по нему учебника, в процессе торможения учебника до его полной остановки. Масса учебника $m = 300$ г, его начальная скорость $v = 2$ м/с.
- 2 У движущегося по горизонтальной дороге автомобиля заглох двигатель, и водитель нажал на педаль тормоза. На сколько изменится внутренняя энергия автомобиля и дороги при торможении автомобиля до его полной остановки? Масса автомобиля $m = 1,5$ т, его начальная скорость $v = 72$ км/ч.
- 3 Молоток массой $m = 300$ г падает на пол с высоты $h = 2$ м. Определите, на сколько изменится в процессе удара о пол внутренняя энергия термодинамической системы, состоящей из молотка и пола.
- 4 Запланируйте и проведите эксперимент по изменению внутренней энергии тела, например алюминиевой проволоки, за счёт совершения над ней работы (многократного сгибания и разгибания). Объясните результаты эксперимента. Выскажите предположение, за счёт каких изменений на молекулярном уровне могло произойти изменение внутренней энергии проволоки.

§ 9

Изменение внутренней энергии термодинамической системы в результате теплообмена

Можно изменить внутреннюю энергию термодинамической системы и без совершения работы.

Представим себе, что нам необходимо нагреть чайник с водой, чтобы заварить чай. При нагревании термодинамической системы увеличивается темп хаотического (теплового) движения молекул этой системы и, значит, увеличивается её внутренняя энергия. Следовательно, нам нужно увеличить внутреннюю энергию рассмотренных тел. Можно было бы совершить над чайником с водой положительную работу. Например, начать натирать чайник или перемешивать воду, находящуюся в нём. Однако обыденный опыт подсказывает, что проще поставить чайник на горячую плиту и тем самым привести термодинамическую систему (чайник с водой) в контакт с более нагретым телом (плитой). В результате чайник с водой нагреется, его внутренняя энергия увеличится. При этом не совершается какая-либо работа. Следовательно, от горячей плиты *холодному* чайнику с водой передаётся энергия без совершения работы. Такой способ передачи энергии от одного тела другому называют *теплообменом*.

Теплообменом называют процесс, при котором одно тело передаёт энергию другому без совершения работы.

Количество энергии, переданной от одного тела к другому в процессе теплообмена, называют количеством теплоты (теплотой).

При теплообмене внутренняя энергия тела, которое получает теплоту, увеличивается на величину, равную полученному количеству теплоты. При этом внутренняя энергия тела, которое отдаёт теплоту, уменьшается на величину, равную отданному количеству теплоты.

Чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_k тела, получившего в процессе теплообмена количество теплоты Q , надо к его начальной внутренней энергии U_0 прибавить это количество теплоты (рис. 21).

Если тело (термодинамическая система) в процессе теплообмена отдаёт количество теплоты Q , то его внутренняя энергия уменьшается на величину, равную Q (рис. 22). В этом случае часто говорят, что тело получает *отрицательное количество теплоты*.

Процесс, при котором тело (термодинамическая система) в результате теплообмена отдаёт некоторое количество теплоты, вам хорошо знаком. Например, чтобы охладить летом минеральную воду или сок, их ставят в

$$U_0 + Q = U_k$$



Рис. 21 При теплообмене конечная внутренняя энергия тела больше начальной на величину количества теплоты Q , переданного телу

$$U_0 - Q = U_k$$



Рис. 22 При теплообмене конечная внутренняя энергия тела меньше начальной на величину количества теплоты Q , отданного телом

холодильник. В процессе охлаждения жидкость отдаёт теплоту холодильнику, и её внутренняя энергия уменьшается. При этом термодинамическая система (бутылка с водой) никакой работы не совершает.

Так же, как и в случае с работой, оба рассмотренных нами случая принято обычно описывать одним уравнением:

$$U_k = U_0 + Q,$$

где Q – количество теплоты, переданное телу (термодинамической системе). При этом если тело получает количество теплоты Q , то значение Q считают положительным. Если же тело отдаёт количество теплоты Q , то значение Q считают отрицательным. Это правило также называют *правилом знаков*.

Отметим особо, что *при теплообмене теплота самопроизвольно всегда передаётся от более нагревого тела к менее нагретому телу*. Другими словами, *тепловые явления необратимы*.

Процесс, при котором одно тело передаёт энергию другому без совершения работы, называют теплообменом.

Количество энергии, переданной от одного тела к другому в процессе теплообмена, называют количеством теплоты (теплотой).

При теплообмене теплота самопроизвольно всегда передаётся от более нагревого тела к менее нагретому телу.

Чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_k тела, получившего (или отдавшего) в процессе теплообмена количество теплоты Q , надо к его начальной внутренней энергии U_0 прибавить это количество теплоты:

$$U_k = U_0 + Q.$$

Если тело получает количество теплоты Q , то значение Q считают положительным. Если же тело отдаёт количество теплоты Q , то значение Q считают отрицательным. Это правило называют правилом знаков.

Вопросы

- 1** Какие способы изменения внутренней энергии термодинамической системы вы знаете?
- 2** Дайте определение процессу теплообмена.
- 3** Что называют количеством теплоты?
- 4** Как изменяется внутренняя энергия термодинамической системы, получившей количество теплоты Q ? Как изменяется внутренняя энергия термодинамической системы, отдавшей количество теплоты Q ?
- 5** В каком случае значение полученного телом количества теплоты считают положительным, а в каком — отрицательным?
- 6** В чашку с горячим чаем кладут холодную ложку. Начнётся ли процесс теплообмена? Если да, то какое из тел будет получать, а какое отдавать теплоту? У какого тела внутренняя энергия будет увеличиваться, а у какого — уменьшаться?

Упражнения

- 1 Вода в работающем электрическом чайнике получила в процессе теплообмена от горячей спирали чайника количество теплоты $Q_1 = 500$ Дж и одновременно отдала окружающей среде количество теплоты $Q_2 = 100$ Дж. Как изменилась за это время внутренняя энергия воды?
- 2  Запланируйте и проведите эксперимент по изменению внутренней энергии тела, например алюминиевой проволоки, за счёт теплообмена (слегка нагрейте над пламенем один конец проволоки). Выскажите предположение, за счёт каких изменений на молекулярном уровне могло произойти изменение внутренней энергии проволоки.

§ 10 Изменение внутренней энергии в общем случае. Закон сохранения энергии при тепловых процессах

Мы выяснили, что внутреннюю энергию термодинамической системы можно изменить двумя различными способами:

- 1) совершить над ней механическую работу;
- 2) передать ей определённое количество теплоты.

Оказывается, эти два процесса могут происходить одновременно. Например, рассмотрим стоящий перед вами стол. Как и любое тело, он состоит из огромного числа молекул. Поэтому стол представляет собой термодинамическую систему.

Положим на стол руку и начнём водить ею по поверхности. Внутренняя энергия стола будет увеличиваться в результате двух процессов. Во-первых, столу будет передаваться теплота от более горячей руки. Во-вторых, внутренняя энергия стола будет увеличиваться в результате работы силы трения руки о стол.

В этом случае, чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_k стола (термодинамической системы), надо к его начальной внутренней энергии U_0 прибавить полученное им количество теплоты Q и работу A , совершенную над ним (рис. 23). Напомним, что работу A во всех случаях рассчитывают в системе отсчёта, где тело в целом покоится.

Теперь рассмотрим тело, которое само совершает работу A и одновременно отдаёт количество теплоты Q . Внутренняя энергия такого тела уменьшается по двум причинам: в результате совершения работы и за счёт теплообмена. Поэтому, чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию

$$U_0 + A + Q = U_k$$



Рис. 23

Конечная внутренняя энергия тела больше начальной на величину работы A , совершенной над покоящимся телом, и количества теплоты Q , переданного телу

U_k такого тела, надо из его начальной внутренней энергии U_0 вычесть совершённую им работу A и отданное им количество теплоты Q :

$$U_0 - A - Q = U_k.$$

Рассмотрим ещё два случая изменения внутренней энергии тела, связанные с совершением работы и теплообменом.

Пусть тело *получает* количество теплоты Q и одновременно совершает работу A . В этом случае внутренняя энергия тела увеличивается в результате теплообмена, но уменьшается на величину совершенной покоящимся телом работы. Поэтому, чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_k такого тела, надо к его начальной внутренней энергии U_0 прибавить полученное им количество теплоты Q и вычесть совершённую им работу A :

$$U_0 + Q - A = U_k.$$

И наконец, если тело *отдаёт* количество теплоты Q и одновременно над ним совершают работу A , то его внутренняя энергия уменьшается в результате теплообмена, но увеличивается в результате совершения над телом работы. Поэтому, чтобы вычислить конечную внутреннюю энергию U_k такого покоящегося тела, надо из его начальной внутренней энергии U_0 вычесть отданное им количество теплоты Q , а затем прибавить совершённую над ним работу A :

$$U_0 - Q + A = U_k.$$

Приведённые выше четыре возможных случая изменения внутренней энергии тела (термодинамической системы) можно описать одним уравнением с учётом известных вам правил знаков для A и Q :

$$U_0 + A + Q = U_k,$$

где A – работа, совершённая над телом, Q – количество теплоты, переданной телу. Если работу совершают над телом, то значение работы A в уравнении будет положительным, если же работу совершает само тело, то значение работы A будет отрицательным.

Аналогично, если тело получает количество теплоты Q , то значение Q в уравнении будет положительным, если же тело отдаёт количество теплоты Q , то значение Q в уравнении будет отрицательным.

Полученное уравнение с учётом правил знаков описывает все возможные случаи изменения внутренней энергии термодинамической системы. Смысл этого уравнения заключается в том, что внутренняя энергия любой термодинамической системы может изменяться только в результате совершения работы (самой системой или над системой) или передачи количества теплоты (системой – внешним телам или системе – от внешних тел).



Внутренняя энергия термодинамической системы может измениться только в результате совершения работы или в процессе теплообмена.

Таким образом, все описанные нами процессы подтверждают, что *энергия не может появиться из ничего или исчезнуть бесследно. Возможен лишь её переход от одного тела к другому или из одного вида в другой.* При этом всегда либо совершается работа, либо происходит теплообмен, либо оба процесса происходят одновременно.

Последнее уравнение представляет собой математическую форму записи **закона сохранения энергии при тепловых процессах** (первого закона термодинамики). Этот закон является частным случаем фундаментального закона природы – закона сохранения энергии.

Энергия не может появиться из ничего или исчезнуть бесследно. Возможен лишь её переход от одного тела к другому или из одного вида в другой.



Закон сохранения энергии при тепловых процессах был открыт в середине XIX в. в результате проведения многочисленных экспериментов несколькими учёными. Английский физик Джеймс Джоуль на протяжении 40 лет проводил эксперименты, подтвердившие, что количество теплоты и работу можно измерять в тех же единицах, что и энергию.

Итоги



Внутреннюю энергию термодинамической системы можно изменить только двумя способами: 1) совершить над системой механическую работу; 2) передать ей определённое количество теплоты. Эти два процесса могут происходить одновременно.

Первый закон термодинамики.

Изменение внутренней энергии тела (термодинамической системы) можно описать уравнением:

$$U_0 + A + Q = U_k,$$

где A – работа, совершенная над телом, а Q – количество теплоты, переданное телу, которые подставлены в уравнение с учётом *правила знаков*. Правило знаков: если работу совершают над телом, то значение работы A считают положительным, если же работу совершает само тело, то значение работы A считают отрицательным; если тело получает количество теплоты Q , то значение Q считают положительным, если же тело отдаёт количество теплоты Q , то его значение считают отрицательным.

Приведённое уравнение является математической формой записи закона сохранения энергии при тепловых процессах.

Закон сохранения энергии.

Энергия не может появиться из ничего или исчезнуть бесследно. Возможен лишь ее переход от одного тела к другому или из одного вида в другой.

Вопросы

- 1 Какие способы изменения внутренней энергии термодинамической системы вы знаете?
- 2 Сформулируйте закон сохранения энергии при тепловых процессах.
- 3 Сформулируйте правило знаков.

Упражнения

- 1 Приведите математическую форму записи закона сохранения энергии при тепловых процессах (первого закона термодинамики) с учётом правила знаков для тела в следующих случаях:
 - а) телу передают количество теплоты, и оно расширяется, совершая работу против сил внешнего давления;
 - б) тело отдаёт количество теплоты и сжимается под действием сил внешнего давления;

- в) телу передают количество теплоты, и оно сжимается под действием внешних сил;
г) тело отдаёт количество теплоты и расширяется, совершая работу против внешних сил.
- ✓ 2 Изучите материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_сохранения_энергии (раздел «История открытия»). Сделайте сообщение на тему истории открытия этого закона. Опишите в своём докладе опыт Джоуля.
- 👤 3 Сравните результаты эксперимента по изменению внутренней энергии алюминиевой проволоки за счёт теплообмена (см. § 9) с результатами эксперимента по изменению её внутренней энергии за счёт совершения над ней работы (см. § 8). Сделайте сообщение в классе.

§ 11

Виды теплообмена

Зададимся вопросом: в чём состоит процесс теплообмена? Почему при теплообмене происходит изменение внутренней энергии тела, получившего или отдавшего определённое количество теплоты?

Рассмотрим различные виды теплообмена и попробуем разобраться в механизме этого процесса с точки зрения молекулярной теории.

Различают три вида теплообмена: *теплопроводность, конвекцию и излучение*. Рассмотрим их по отдельности.

Теплопроводность

Проведите эксперимент: опустите один конец металлической ложки в горячий чай. Если вы будете держать ложку за другой конец, то через некоторое время почувствуете, что ложка нагревается. Следовательно, её внутренняя энергия увеличивается. Понятно, что это происходит в результате передачи теплоты от более нагретого конца ложки к менее нагретому.

Процесс передачи теплоты от одной части тела к другой или от одного тела к другому при их непосредственном контакте называют теплопроводностью.

Отметим особо, что *при теплопроводности не происходит переноса вещества*, из которого состоит теплопроводящее тело (или соприкасающиеся тела). Другими словами, молекулы вещества, по которому «движется» теплота, остаются на своих местах.

В чём же состоит механизм передачи теплоты от более нагретой части тела к менее нагретой?

Рассмотрим сначала, как передаётся теплота в твёрдых телах.

Вы помните, что в твёрдом теле молекулы хаотически колеблются около положения своего равновесия. При этом в более нагретой части тела молекулы движутся более интенсивно, чем в менее нагретой, и, значит, их колебания происходят с большими скоростями. Вы знаете, что молекулы в твёрдом теле взаимодействуют со своими соседями. В результате этого взаимодействия интенсивно колеблющиеся молекулы более нагретой части «раскачивают» своих «медлительных» соседей, передавая им часть энергии своего движения. Те, в свою очередь, «раскачивают» своих соседей и т. д. Таким образом, происходит передача энергии хаотического (теплового) движения молекул от более нагретых частей тела к менее нагретым.

В различных веществах силы взаимодействия между соседними молекулами различны. Поэтому скорости теплопроводности в них отличаются друг от друга.

Наибольшей теплопроводностью обладают металлы. Самые теплопроводные из них – серебро и медь. На рис. 24 изображена кювета со стержнями из различных материалов, которые соединены с равномерно нагреваемой пластиной. Стержни покрыты слоем воска, на который надеты муфты. Сравнение скоростей сползания муфт из-за плавления воска позволяет определить, какой материал обладает большей теплопроводностью.

Веществами с низкой теплопроводностью являются асбест, пеностекло, дерево, стекло и резина. **K**

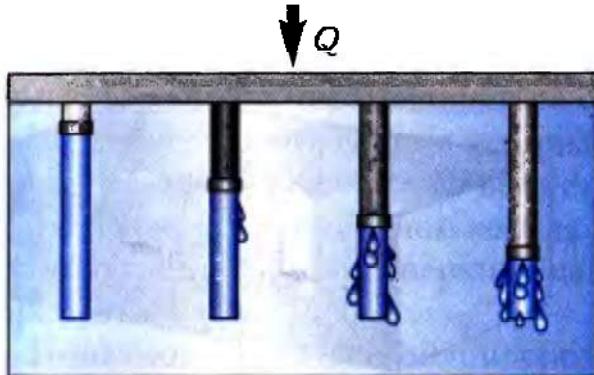
Теплопроводность жидкостей невелика. Если воду в пробирке нагревать сверху (рис. 25), то кусок льда, закреплённый на дне, не будет таять, в то время как вода на поверхности уже начнёт закипать.

Механизм теплопроводности в жидкостях аналогичен механизму теплопроводности в твёрдых телах. Однако молекулы в жидкостях расположены, как правило, на больших расстояниях друг от друга, и взаимодействие между ними меньше, чем в твёрдых телах. Поэтому процесс передачи энергии теплового движения от молекулы к её соседям в жидкостях затруднён. Этим и объясняется малая теплопроводность жидкостей.

В газах среднее расстояние между молекулами значительно больше, чем в жидкостях. Силы взаимодействия между молекулами почти не проявляются. Поэтому газы ещё менее теплопроводны, чем жидкости. Напри-



Теплопроводность веществ учитывают при выборе материала для различных изделий. Например, посуду для приготовления пищи на огне изготавливают из металлов и их сплавов, обладающих высокой теплопроводностью, а вот ручки для неё делают из пластмасс и других веществ с низкой теплопроводностью.



Стекло Железо Латунь Медь

Рис. 24

Воск плавится быстрее на стержнях с высокой теплопроводностью



Рис. 25

Из-за низкой теплопроводности воды лёд на дне пробирки не тает

мер, можно очень близко поднести палец к горящей электрической лампочке и не обжечься.

Шерсть, вата, пух, мех и другие пористые тела обладают низкой теплопроводностью, так как между волокнами этих веществ содержится воздух. Поэтому зимнюю одежду утепляют этими материалами. Слой воздуха между оконными стеклами также хорошо сохраняет тепло зимой.

! Таким образом, явление теплопроводности в твёрдой, жидкой и газообразной средах заключается в переносе теплоты от одних частей среды к другим без переноса вещества. При этом частицы среды, обладающие большей кинетической энергией хаотического (теплового) движения, передают часть этой энергии соседним частицам.

Конвекция

Известно, что тёплый воздух является менее плотным, чем холодный. Это связано с тем, что в нагретом воздухе (или жидкости) молекулы движутся быстрее, чем в холодном. Поэтому они как бы сильнее «разбегаются» в разные стороны, и среднее расстояние между молекулами становится больше.

Под действием силы Архимеда менее плотный тёплый воздух (или жидкость) поднимается вверх, так как его выдавливает более плотный холодный воздух (или жидкость). Напротив, холодный воздух, если он находится выше тёплого, опускается вниз. Можно сказать, что более плотный холодный воздух как бы «тонет» в тёплом воздухе, как тонет кусок металла в воде. Такие же явления наблюдаются и в неравномерно нагретой жидкости (рис. 26).



Рис. 26 При нагревании жидкости снизу в результате конвекции происходит перемешивание её холодных и тёплых слоев

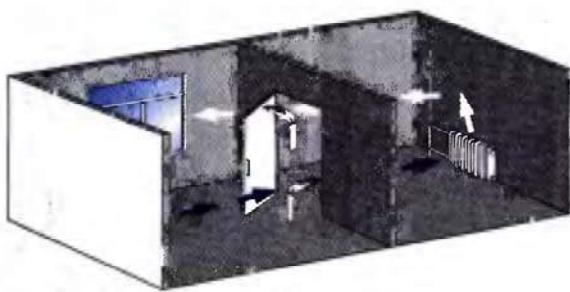


Рис. 27 Нагретый и менее плотный воздух поднимается вверх, более плотный и холодный воздух перемещается вдоль пола

Процесс теплообмена, происходящий за счёт перемещения нагретых и холодных частей вещества (газа, жидкости или крупинок сыпучего твёрдого вещества, например песка), называют конвекцией.

В твёрдых телах частицы практически не изменяют своего положения друг относительно друга. Поэтому конвекция в твёрдых телах не наблюдается.

! В отличие от теплопроводности при конвекции происходит перенос вещества.

Проведём эксперимент: возьмём в руки зажжённую свечу и исследуем потоки воздуха в квартире, где находится сильно разогретая батарея или печь. Легко убедиться в том, что нагретый от батареи и менее плотный воздух поднимается вверх (рис. 27) и движется под потолком в глубь квартиры, постепенно остывая. На его место, двигаясь вдоль пола, приходит более плотный холодный воздух. Пламя свечи, отклоняемое воздушным потоком, будет указывать направление его движения.

Это движение особенно заметно рядом с открытой дверью, разделяющей более прогретую комнату и холодную. В результате такого движения происходит *перемешивание нагретых и холодных частей воздуха*.

Конвекция бывает двух видов: *естественная* (свободная) и *вынужденная*. Нагревание газов и жидкостей, показанное на рис. 26 и 27, происходит за счёт естественной конвекции.

Условием естественной конвекции является нагревание жидкости или воздуха снизу. В ином случае менее плотные верхние тёплые слои не будут спускаться вниз и перемешиваться с холодными нижними слоями.

Вынужденная конвекция возникает при принудительном перемешивании неравномерно нагретого вещества мешалкой, вентилятором и т. п. Ярким примером вынужденной конвекции является шторм в море. При штурме волны перемешивают верхние нагретые и нижние более холодные слои морской воды. 

Понятно, что теплообмен посредством теплопроводности и конвекции возможен только при наличии вещества. Если убрать вещество (например, откачать воздух) из замкнутого пространства между двумя телами и тем самым создать вакуум, то процесс передачи теплоты от одного тела к другому рассмотренными способами станет невозможным. Поэтому для сохранения тела нагретым в термосах (рис. 28) из пространства между двумя колбами откачивают воздух.

Излучение

Существует ещё один вид теплообмена — излучение и поглощение электромагнитных волн (это видимый свет, инфракрасные, ультрафиолетовые лучи и др.).

Все нагретые тела излучают электромагнитные волны. Это излучение легко чувствовать, приблизившись к горячей печке, раскалённой плите и т. п. Чем сильнее нагрето тело, тем большую энергию оно излучает.

При излучении внутренняя энергия его источника уменьшается на величину излучённой энергии. Напротив, при поглощении излучения внутренняя энергия тела увеличивается на величину поглощённой энергии.



Рис. 28

Колба термоса долго сохраняет тело нагретым благодаря двойным посеребрённым стенкам, между которыми нет воздуха



Известно, что при нормальном атмосферном давлении вода имеет наибольшую плотность при температуре 4 °C. Таким образом, при температурах воздуха ниже 4 °C более холодная вода удерживается в верхних слоях водоёма. Кроме того, теплопроводность воды, как уже отмечалось, чрезвычайно мала. По этим двум причинам достаточно глубокие реки и озёра даже в самые суровые зимы не промерзают до дна. Это сохраняет жизнь рыбам и другим существам.

Отметим, что если вода находится под значительным давлением, то температура, соответствующая наибольшей плотности воды, оказывается ниже 4 °C, а именно 1,5 °C. Такую неизменную температуру имеет вода в морях и океанах на глубине более 3 км, причём как в полярных, так и в тропических широтах.

Электромагнитные волны могут распространяться не только в веществе, но и в вакууме. Поэтому, в отличие от теплопроводности и конвекции, для передачи теплоты излучением от одного тела к другому наличие какого-либо вещества между ними не обязательно.

Тела с тёмной поверхностью испускают и поглощают электромагнитные волны лучше, чем тела со светлой поверхностью. Это различие в способности тел излучать и поглощать энергию используют на практике. Так, стенки термоса (рис. 28) обычно серебрят, а летательные аппараты и резервуары с горючими жидкостями и газами окрашивают белой краской. Напротив, для увеличения поглощательной способности поверхность тела окрашивают в чёрный цвет (например, баки для нагрева воды).

Ярким примером теплопередачи посредством излучения является передача теплоты от Солнца нашей планете. Несмотря на значительное удаление (около $15 \cdot 10^7$ км), Земля получает от Солнца огромную энергию ($2 \cdot 10^{14}$ кДж за каждую секунду). ■



Какой день бывает теплее — ясный или пасмурный? Вы легко припомните, что летом ясные дни жарче, а зимой, наоборот, холоднее. Дело в том, что слой облаков и туч задерживает не только те лучи, которые идут от Солнца к поверхности Земли, но и те лучи, которые сама Земля испускает в пространство. Летом, в течение длинного светового дня, Земля получает от Солнца больше энергии, чем излучает за сутки. Поэтому летом, при облаках, уменьшение и «прихода», и «расхода» энергии ведёт к охлаждению Земли. Зимой, когда «расход» больше «прихода», слой облаков, наоборот, задерживает теплоту, которая излучается в межзвёздное пространство.

Итоги

Теплообмен может осуществляться за счёт теплопроводности, конвекции и излучения.

Процесс передачи теплоты от одной части тела к другой или от одного тела к другому при их непосредственном контакте называют теплопроводностью.

Процесс теплообмена, происходящий за счёт перемещения нагретых и холодных частей вещества, называют конвекцией.

Излучение — это процесс теплообмена посредством электромагнитных волн. Для передачи теплоты излучением от одного тела к другому наличие вещества между ними не обязательно.

Горячие тела излучают больше, чем холодные.

Тела с тёмной поверхностью как излучают, так и поглощают электромагнитные волны лучше, чем тела со светлой поверхностью.

Вопросы

- 1 Какие виды теплообмена вы знаете?
- 2 Что такое теплопроводность?
- 3 В чём состоит механизм теплопроводности с точки зрения молекулярной теории?
- 4 Почему разные вещества обладают разной теплопроводностью?
- 5 Приведите примеры веществ, обладающих наибольшей и наименьшей теплопроводностью.
- *6 Почему металлические предметы в комнате кажутся на ощупь более холодными, чем деревянные в той же комнате?
- *7 О какую ложку легче обжечься — металлическую или деревянную?
- 8 Что такое конвекция? Какие виды конвекции вы знаете? Приведите примеры.
- *9 Возможна ли естественная конвекция при невесомости (например, в космическом корабле)?
- 10 Почему форточки для проветривания и кондиционеры помещают в верхней части комнаты?
- *11 Почему тяга в печах с более высокими дымовыми трубами больше?
- 12 Что такое излучение?
- 13 Какие тела лучше поглощают и испускают излучение?
- 14 Почему колбы термосов делают с двойными стенками, между которыми создают вакuum? Зачем серебрят эти стенки?

Упражнения

-  1 *Внимание! Эксперимент проводится в присутствии взрослых. Приоткройте дверь в комнату так, чтобы имелась небольшая щель. Зажгите свечу. Наблюдая за отклонением пламени свечи, исследуйте воздушные потоки у двери. Объясните наблюдаемые явления и сделайте сообщение в классе.*
-  2 Соберите сведения о свойствах различных материалов, используемых для изготовления одежды. Подготовьте рекомендации по выбору одежды (материалы, цвет, фасон) для различных климатических и погодных условий.
Продолжите работу по проекту после изучения тем «Испарение и конденсация» (см. § 17) и «Влажность воздуха» (см. § 18).

- ✓ 3 Соберите сведения о свойствах различных отделочных материалов, применяемых в строительстве. Подготовьте рекомендации по их выбору для разных климатических зон.

§ 12 Температура и тепловое равновесие

Эксперименты показывают, что при теплообмене теплота всегда переходит от более нагретых тел к менее нагретым. Горячая сковородка, оставленная на выключенной плите, отдаёт свою теплоту окружающему её воздуху кухни. Напротив, мороженое в блюдце, получая теплоту от окружающих предметов, нагревается и тает. Рассматривая процесс теплообмена, мы всегда можем выяснить, какое из двух тел является более нагретым. Это позволяет ввести такую физическую величину, как *температура*.

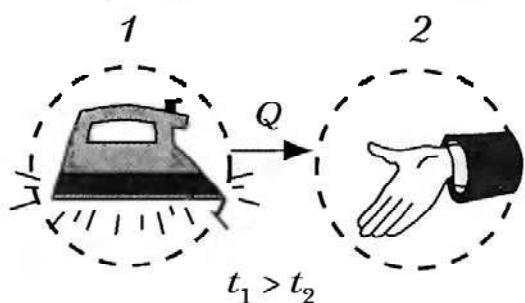


Рис. 29

Если тело 1 в процессе теплообмена передаёт теплоту телу 2 (рис. 29), то тело 1 нагрето больше, чем тело 2. В этом случае говорят, что температура тела 1 выше, чем температура тела 2 ($t_1 > t_2$).

Напротив, если в процессе теплообмена тело 1 получает теплоту от тела 2 (рис. 30), то тело 1 нагрето меньше, чем тело 2. В этом случае говорят, что $t_1 < t_2$.

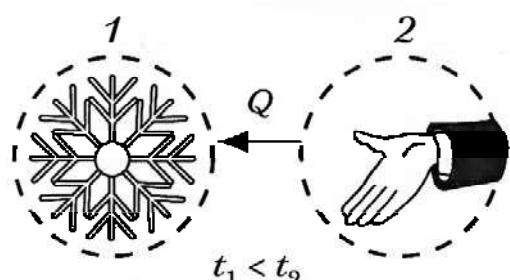


Рис. 30

Если же приведённые в тепловой контакт тела 1 и 2 не обмениваются количеством теплоты (рис. 31), то эти тела одинаково нагреты. Тогда их температуры считают равными ($t_1 = t_2$).

Рассмотрим, как происходит процесс теплообмена между двумя телами (термодинамическими системами), на простом примере. Приведём два тела, имеющие разную температуру, в тепловой контакт. Например, нальём горячий чай в холодную керамическую

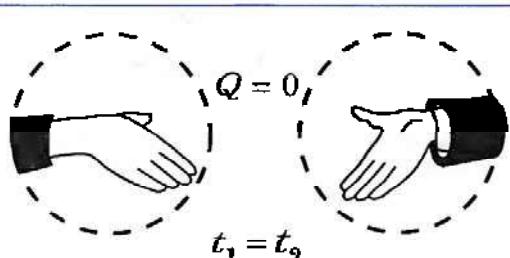


Рис. 31

кружку. Ясно, что в этом случае начнётся процесс теплообмена. Чай будет отдавать теплоту кружке: кружка будет нагреваться, а чай остывать. До каких пор будет происходить этот процесс? Оказывается, если пренебречь теплообменом этих тел с окружающей средой (воздухом в комнате, столом, на котором стоит кружка), то со временем передача теплоты от чая к кружке прекратится. Их температуры станут одинаковыми. В этом случае говорят, что кружка и чай пришли в *состояние теплового (термодинамического) равновесия*.

Теперь можно сформулировать определение *температуры*.

Температура – физическая величина, характеризующая степень нагретости термодинамической системы, находящейся в состоянии теплового (термодинамического) равновесия.

Будем считать, что рассмотренные нами кружка и налитый в неё чай представляют собой единую термодинамическую систему. Проведённый нами эксперимент показывает, что со временем в этой термодинамической системе наступает тепловое равновесие.

■ Все тела (части) системы, находящиеся в термодинамическом равновесии, имеют одну и ту же температуру.

А всегда ли система приходит в состояние теплового (термодинамического) равновесия? Понятно, что кружка и чай обмениваются количеством теплоты не только между собой, но и с окружающими телами, например с воздухом в комнате. Если вы близко поднесёте руку к кружке, то почувствуете, как уходит от неё теплота. Однако скорость передачи теплоты между телами рассмотренной термодинамической системы (кружкой и чаем) много больше скорости отдачи ими теплоты другим телам (например, воздуху). Поэтому в данном процессе теплообмен с другими телами можно считать малым. В этом случае термодинамическую систему «чай – кружка» приближённо можно считать *теплоизолированной*.

Теплоизолированной называют такую термодинамическую систему, которая не обменивается теплотой с внешними (не входящими в систему) телами.

Хотя идеальной изолирующей оболочки, не допускающей теплообмена между рассматриваемой термодинамической системой (телом) и внешней средой, не существует, термос во многих случаях можно считать такой оболочкой.

Чем уже известно, что обмен энергией между телами термодинамической системы возможен только двумя способами: за счёт совершения работы и при помощи теплообмена. Если ни над одним из тел термодинами-

ческой системы не совершают работы внешние силы (силы, действующие со стороны тел, не входящих в эту систему), то такую систему называют механически изолированной. Если же эта система является ещё и теплоизолированной, то её называют *полностью изолированной*.

Все известные эксперименты и наблюдения показывают, что температуры всех тел полностью изолированной термодинамической системы по прошествии достаточного промежутка времени становятся равными.

Если термодинамическая система является полностью изолированной, она с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия.

Это утверждение является одним из фундаментальных законов природы, его часто называют *нулевым законом термодинамики*.

Итоги

Температура — физическая величина, характеризующая степень нагретости термодинамической системы, находящейся в состоянии теплового (термодинамического) равновесия.

Теплоизолированной называют такую термодинамическую систему, которая не обменивается теплотой с внешними (не входящими в систему) телами.

Систему, ни над одним из тел которой внешние тела не совершают работы, называют механически изолированной.

Термодинамическую систему называют полностью изолированной, если она является механически и теплоизолированной.

Нулевой закон термодинамики.

Если термодинамическая система является полностью изолированной, она с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия.

Вопросы

- 1 Как определить, какое из двух тел является более нагретым? Температура какого из этих тел больше?
- 2 В каком случае говорят, что два тела нагреты одинаково? Как в этом случае соотносятся температуры тел?

- 3** Какое состояние термодинамической системы называют состоянием теплового (термодинамического) равновесия?
- 4** Какую систему тел называют теплоизолированной?
- 5** Какую систему тел называют механически изолированной?
- 6** Какую систему тел называют полностью изолированной?
- 7** Любая ли термодинамическая система с течением времени приходит в состояние теплового равновесия?
- 8** Сформулируйте нулевой закон термодинамики.

§ 13

Измерение температуры. Термометр

В предыдущем параграфе была введена новая физическая величина – температура тела (термодинамической системы). Однако мы не обсудили способ измерения этой величины.

Оказывается, процесс измерения температуры основан на свойстве всех полностью изолированных термодинамических систем самопроизвольно приходить в состояние теплового равновесия. Действительно, вспомните, как вы измеряете температуру своего тела на приёме у врача. Вы приводите термометр в тепловой контакт со своим телом. Затем ожидаете некоторое время. Почему? Что происходит в течение этого времени?

Теперь, когда вы познакомились с основами термодинамики, становится понятным, что вы ждёте окончания процесса теплообмена между вашим «горячим» телом и «холодным» термометром. Иначе говоря, вы ждёте, когда между этими телами наступит состояние теплового равновесия. К этому моменту температуры тел, находящихся в тепловом контакте, станут равными. После этого, посмотрев на шкалу термометра, вы узнаёте температуру своего тела.

Таким образом, мы приходим к выводу.



Процесс измерения температуры основан на достижении теплового равновесия между телом, температура которого измеряется, и термометром.

А что такое термометр? Каким требованиям должен удовлетворять прибор, предназначенный для измерения температуры?

Во-первых, этот прибор должен содержать рабочее вещество, параметры которого однозначно изменяются при изменении его температуры. Чаще всего используют явление *теплового расширения рабочего вещества при его нагревании*.



Рис. 32 Ртутный термометр

Например, в ртутном (или спиртовом) термометре используют ртуть (или спирт), объём которой увеличивается при нагревании и, соответственно, уменьшается при охлаждении. Приходя в тепловое равновесие с телом, температура которого измеряется, жидкость в термометре расширяется (или сжимается) до определённого объёма. Однако изменения объёма рабочего вещества очень малы. Поэтому к резервуару с жидкостью припаивают тонкую длинную запаянную с другой стороны трубочку (рис. 32). Рядом с этой трубочкой помещают шкалу.

Чтобы определить температуру, мы должны дождаться состояния теплового равновесия и посмотреть на число у отметки шкалы, напротив которой остановилась верхняя граница расширяющейся жидкости. Таким образом, мы приходим ко второму требованию, предъявляемому к любому термометру: шкала термометра должна быть соответствующим образом оцифрована.

Существуют различные температурные шкалы. В быту чаще всего используют знакомую вам шкалу Цельсия. Она названа так в честь её создателя, шведского учёного Андерса Цельсия, и основана на двух фиксированных значениях температуры. Первое значение — температура таяния чистого льда при нормальном атмосферном давлении. Значение этой температуры принимается за $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Второе значение — температура кипения чистой

воды при нормальном атмосферном давлении. Она считается равной $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расстояние между этими точками на шкале термометра делится на сто равных частей, и получают единицу измерения — 1 градус Цельсия ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

В научных исследованиях принято использовать так называемую абсолютную (термодинамическую) шкалу температур Кельвина. Своим названием она обязана предложившему её английскому физику Уильяму Томсону (lordу Кельвину). Эта шкала построена на основе законов термодинамики. За нуль (абсолютный нуль) Кельвином была принята такая температура, при которой тело *не может* передать теплоту никакому другому телу, так как другого менее нагревого тела не существует в природе. С точки зрения молекулярной теории нулевая температура тела по шкале Кельвина означает, что кинетическая энергия хаотического движения мо-

молекул этого тела равна нулю. Иначе говоря, молекулы этого тела покоятся друг относительно друга. Подробнее мы расскажем об этом в главе 4.

! За единицу абсолютной температуры принят 1 кельвин (К), который равен 1 градусу Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

Соотношение значений температур по различным шкалам представлено на рис. 33. **С**

По шкале Цельсия абсолютному нулю по шкале Кельвина соответствует температура $-273,15\ ^{\circ}\text{C}$ (при расчётах приближённо считают $-273\ ^{\circ}\text{C}$).

В отличие от температур по шкале Цельсия, абсолютную температуру принято обозначать буквой T . Из сказанного ясно, что $T = t + 273$, где t — температура по шкале Цельсия.

Рассмотрим третье требование к термометру. Мы уже отмечали, что процесс измерения температуры основан на достижении теплового равновесия между термометром и телом, температуру которого измеряют. В этом процессе термометр получает от этого тела (или отдаёт) определённое количество теплоты. В результате будет изменяться температура самого тела: если термометр нагревался, то исследуемое тело остыпало, и наоборот. В любом случае измеренная температура теплового равновесия

	Шкала Кельвина	Шкала Цельсия	Шкала Фаренгейта
<u>Кипение воды</u>	373 К	100 $^{\circ}\text{C}$	212 $^{\circ}\text{F}$
<u>Температура тела человека</u>	310 К	37 $^{\circ}\text{C}$	99 $^{\circ}\text{F}$
<u>Плавление льда</u>	273 К	0 $^{\circ}\text{C}$	32 $^{\circ}\text{F}$
<u>Абсолютный нуль</u>	0 К	-273 $^{\circ}\text{C}$	-459 $^{\circ}\text{F}$

Рис. 33 Шкалы температур

С В некоторых странах пользуются шкалой Фаренгейта. По этой шкале за $0\ ^{\circ}\text{F}$ принимается самая низкая температура в Голландии в зиму 1709 г. Вторая точка шкалы соответствует температуре смеси льда и воды ($32\ ^{\circ}\text{F}$) при нормальном атмосферном давлении. Расстояние между этими точками на шкале Фаренгейт разделил на 32 равные части. Позже была введена ещё одна точка — температура кипения воды, равная $212\ ^{\circ}\text{F}$.

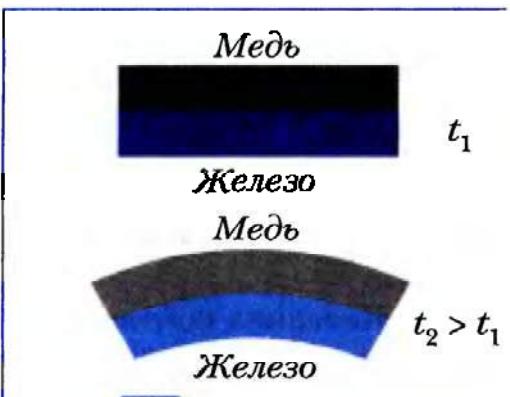


Рис. 34

Биметаллическая пластина изгибаются при увеличении температуры

будет несколько отличаться от начальной температуры тела, которую мы хотели измерить. Это отличие зависит от того, насколько значительным было изменение температуры тела при теплообмене с термометром.

Таким образом, используемый в эксперименте термометр должен быть таким, чтобы изменение температуры тела в процессе измерения было незначительным.

В заключение отметим, что в современных термометрах используются различные явления, обусловленные изменением температуры их рабочего тела. Так, в настоящее время наибольшее распространение получили термометры, действие которых основано на изменении электрических характеристик различных веществ в зависимости от температуры, — электронные термометры. В технике для регулирования температуры широко используют так называемые *биметаллические пластинки*. Они склеены из металлов, по-разному изменяющих свою длину при нагревании (рис. 34). При изменении температуры биметаллическая пластинка изгибается и замыкает или размыкает контакты, через которые нагревательный элемент, например утюга или электрического чайника, подсоединяется к электрической сети. ■

С Использование для измерения температуры методов, основанных на различных физических явлениях, позволяет в настоящее время измерять очень низкие и высокие температуры. Ясно, что температуру в сотни или тысячи градусов по Цельсию нельзя измерить обычным ртутным термометром. Для измерения таких температур применяют оптические пирометры, принцип действия которых основан на законах теплового излучения.

Итоги

Для измерения температуры используют свойство всех полностью изолированных термодинамических систем приходить в состояние теплового равновесия.

Измерение температуры основано на достижении теплового равновесия между телом, температура которого измеряется, и термометром.

Термометр, во-первых, должен содержать рабочее вещество, параметры которого однозначно изменяются при изменении

его температуры; во-вторых, его шкала должна быть соответствующим образом оцифрована; в-третьих, используемый термометр должен быть таким, чтобы изменение температуры тела в процессе измерения было незначительным.

За единицу абсолютной температуры принят 1 кельвин (К), который равен 1 градусу Цельсия ($^{\circ}\text{C}$).

По шкале Цельсия абсолютному нулю по шкале Кельвина соответствует температура $-273,15\ ^{\circ}\text{C}$ (при расчётах приближённо считают $-273\ ^{\circ}\text{C}$).

Вопросы

- 1 Какое свойство термодинамических систем используют в процессе измерения температуры?
- 2 В чём заключается процесс измерения температуры?
- 3 Что такое термометр?
- 4 Каким условиям должен удовлетворять прибор для измерения температуры?
- 5 Что называют градуировкой термометра?
- 6 Как построена шкала Цельсия? Какие температуры приняты за 0 и $100\ ^{\circ}\text{C}$? Что принято за единицу температуры по этой шкале?
- 7 Как построена шкала Кельвина? Какая температура была принята Кельвином за нулевую? Что принято за единицу температуры по этой шкале?
- 8 Как связаны между собой температуры шкал Цельсия и Кельвина?

Упражнения

- 1 Снимите показания комнатного термометра и наружного (за окном). Вычислите полученные значения температур воздуха по абсолютной (термодинамической) шкале.
- 2 Определите цену деления шкалы медицинского термометра. С какой точностью можно измерить температуру тела человека этим термометром?
- 3 Измерьте температуру собственного тела медицинским термометром, снимая показания через 1; 2; 4; 8 минут после начала измерения. Сравните полученные значения и объясните результаты измерений. (Перед началом замеров температуры встрях-

- ните термометр, чтобы столбик ртути целиком опустился из трубки в резервуар.)
- 4 На сколько градусов по шкале Фаренгейта отличаются температуры плавления льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении?
- *5 Как вы думаете, можно ли измерить температуру, соответствующую 0 К? Объясните свой ответ.
- *6 Пользуясь рис. 33, выведите формулу для перевода значений температур по шкале Цельсия в температуры по шкале Фаренгейта.
- 7 Изучите историю создания жидкостного термометра по материалам интернет-ресурса <http://nature.web.ru/db/msg.html>. Сделайте сообщение в классе.
- 8 Сформулируйте и обоснуйте гипотезу о влиянии конструктивных особенностей термометра на погрешность измерения температуры. Например, сравните конструкции спиртового термометра для измерения температуры воды и медицинского ртутного термометра. Сделайте сообщение в классе.

§ 14

Теплоёмкость тела. Удельная теплоёмкость

Рассмотрим ещё раз процесс теплообмена. Нальём в предварительно разогретую кружку небольшое количество холодной воды. Между кружкой и водой начнётся процесс теплообмена. Если начальная температура кружки больше начальной температуры воды, то теплота будет передаваться от кружки к воде. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие, т. е. пока температура воды не сравняется с температурой кружки.

Следовательно, в процессе теплообмена температура тела, получающего теплоту, *увеличивается*, а температура тела, отдающего теплоту, *уменьшается*. Понятно, что чем большее количество теплоты получает тело, тем сильнее увеличивается его температура. Соответственно, чем большее количество теплоты отдаёт другое тело, тем сильнее уменьшается его температура.

Многочисленные эксперименты показывают, что увеличение температуры тела (разность конечной и начальной температур $\Delta t = t_k - t_n$) пропорционально количеству теплоты, переданному телу.

В этом легко убедиться, если следить за температурой воды, нагреваемой в электрическом чайнике. Чем дольше работает чайник, тем большее количество теплоты его спираль отдаёт воде и тем сильнее увеличивается температура воды.



Увеличение температуры тела при теплообмене пропорционально переданному телу количеству теплоты.

Таким образом, количество теплоты Q , полученное телом, и изменение его температуры связаны соотношением:

$$Q = C \cdot (t_k - t_n) = C \cdot \Delta t,$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Теплоёмкостью тела называют коэффициент C , равный отношению количества теплоты, полученного телом, к соответствующему изменению его температуры:

$$C = \frac{Q}{\Delta t}.$$

Из этого определения следует, что теплоёмкость тела численно равна количеству теплоты, которое необходимо передать телу для увеличения его температуры на один градус.

Если известны теплоёмкость C тела и полученное им количество теплоты Q , то изменение температуры тела можно рассчитать по формуле:

$$\Delta t = t_k - t_n = \frac{Q}{C}.$$

Из этой формулы видно, что если тело получает теплоту, то его температура **увеличивается** ($t_k > t_n$).

Пусть у тела забирают количество теплоты Q . В этом случае в соответствии с правилом знаков принято считать, что тело получает количество теплоты $-Q$. При этом изменение температуры тела $\Delta t = t_k - t_n = -\frac{Q}{C}$ будет отрицательным. Другими словами, температура тела будет уменьшаться, так как $t_k - t_n < 0$, поэтому $t_k < t_n$.

От чего зависит теплоёмкость тела?

Теперь, когда мы знаем, что передача телу определённого количества теплоты приводит к увеличению его температуры и, следовательно, его внутренней энергии, мы можем ответить на этот вопрос.

Понятно, что для нагревания на один градус, например, 2 кг воды потребуется в два раза большее количество теплоты, чем для нагревания на один градус 1 кг той же воды. Действительно, при нагревании воды увеличивается её внутренняя энергия, т. е. кинетическая энергия хаотического движения молекул и потенциальная энергия взаимодействия молекул друг с другом. Но в 2 кг воды содержится в два раза больше молекул, чем в 1 кг. Следовательно, для увеличения внутренней энергии 2 кг воды потребуется в два раза большее количество теплоты. Из сказанного ясно, что теплоёмкость

кость 2 кг воды будет больше теплоёмкости 1 кг воды в два раза. Таким образом, теплоёмкость однородного тела пропорциональна его массе.

Количество теплоты, необходимое для нагревания на один градус данного вещества массой 1 кг, называют удельной теплоёмкостью этого вещества.

Удельную теплоёмкость обозначают буквой c . Единицу удельной теплоёмкости в СИ называют джоуль на килограмм-кельвин, Дж/(кг · К).

Вы уже знаете, что, во-первых, молекулы различных веществ имеют разную массу, во-вторых, они по-разному взаимодействуют друг с другом и движутся. Следовательно, *теплоёмкости одной и той же массы разных веществ могут отличаться*.

Удельную теплоёмкость вещества определяют экспериментально. В таблице 2 приведены удельные теплоёмкости некоторых веществ и материалов при нормальном атмосферном давлении и температурах, близких к 0 °С.

Таблица 2

Вещество, материал	Удельная теплоёмкость, кДж/(кг · К)	Вещество, материал	Удельная теплоёмкость, кДж/(кг · К)
Азот	1,05	Железо	0,45
Водород	14,3	Золото	0,13
Воздух	1,01	Медь	0,38
Кислород	0,91	Олово	0,23
Вода	4,2	Свинец	0,13
Спирт	2,5	Стекло	0,84
Ртуть	0,14	Дерево	2,5
Алюминий	0,90	Лёд	2,1

Таким образом, для определения теплоёмкости C однородного тела массой m , состоящего из вещества с удельной теплоёмкостью c , надо его массу умножить на удельную теплоёмкость этого вещества:

$$C = m \cdot c.$$

Поэтому если такое тело получает количество теплоты Q , то изменение его температуры

$$\Delta t = t_{\text{к}} - t_{\text{н}} = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{m \cdot c}.$$

Воспользуемся полученными знаниями для решения задач.

Задача 1. Воде массой $m = 1,5$ кг, находящейся в чайнике, передали количество теплоты $Q = 440$ кДж. Определите конечную температуру воды, если её начальная температура $t_h = 20$ °С.

Решение.

Воспользуемся формулой для расчёта изменения температуры тела при нагревании:

$$\Delta t = Q / (m \cdot c) = 440 \cdot 10^3 / (1,5 \cdot 4,2 \cdot 10^3) = 70 \text{ } (\text{°C}).$$

Поэтому конечная температура воды $t_k = t_h + \Delta t = 90$ °С.

Ответ: конечная температура воды $t_k = 90$ °С.

Задача 2. Железную платформу утюга массой $m = 1$ кг нагрели до температуры $t_0 = 120$ °С. После выключения утюга через некоторое время температура его платформы стала равна комнатной температуре $t_k = 20$ °С. Определите количество теплоты, отданное платформой утюга за это время.

Решение.

Определим изменение температуры платформы утюга:

$$\Delta t = t_k - t_0 = -100 \text{ } (\text{°C}).$$

Воспользуемся формулой, связывающей изменение температуры тела с полученным количеством теплоты при теплообмене (значение удельной теплоёмкости железа возьмём из таблицы 2):

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t = 0,45 \cdot 1 \cdot (-100) = -45 \text{ (кДж).}$$

Отрицательное значение полученного количества теплоты означает, что платформа утюга, охлаждаясь, *отдала* это количество теплоты.

Ответ: платформа утюга отдала 45 кДж.

Итоги

Количество теплоты Q , полученное телом при теплообмене, и изменение температуры тела связаны соотношением:

$$Q = C \cdot (t_k - t_h) = C \cdot \Delta t.$$

Теплоёмкостью тела называют коэффициент C , равный отношению количества теплоты, полученного телом, к соответствующему изменению его температуры:

$$C = \frac{Q}{\Delta t}.$$

Теплоёмкость однородного тела пропорциональна массе этого тела.

Удельной теплоёмкостью вещества называют количество теплоты, необходимое для нагревания на один градус 1 кг этого вещества.

Удельную теплоёмкость обозначают буквой c . Единица удельной теплоёмкости в СИ – джоуль на килограмм-kelвин, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Для определения теплоёмкости C однородного тела массой m , состоящего из вещества с удельной теплоёмкостью c , надо его массу умножить на удельную теплоёмкость этого вещества:

$$C = m \cdot c.$$

Если однородное тело в процессе теплообмена получает количество теплоты Q , то изменение его температуры равно:

$$\Delta t = t_{\text{k}} - t_{\text{h}} = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{m \cdot c},$$

где m – масса этого тела, c – удельная теплоёмкость вещества этого тела.

Вопросы

- 1 Что называют теплоёмкостью тела? В каких единицах СИ её измеряют?
- 2 В каком случае в результате теплообмена температура тела увеличивается, а в каком уменьшается?
- 3 Как зависит теплоёмкость однородного тела от его массы?
- 4 Что называют удельной теплоёмкостью вещества?
- 5 Почему различаются удельные теплоёмкости разных веществ?
- 6 Запишите, чему равно изменение температуры однородного тела при теплообмене, если известны масса тела, удельная теплоёмкость вещества, из которого оно состоит, и количество полученной телом теплоты.
- 7 Как изменится ответ на предыдущий вопрос, если в процессе теплообмена тело не получило, а отдало такое же количество теплоты?

Упражнения

- При выполнении заданий используйте данные таблицы 2.
- 1 Термос ёмкостью $V = 3 \text{ л}$ заполнили кипящей водой и закрыли. Через сутки температура воды стала $t_k = 80^\circ\text{C}$. Какое количество теплоты отдала вода за это время?
 - 2 Какое количество теплоты потребуется передать ртути термометра при его нагревании от комнатной температуры ($t_0 = 20^\circ\text{C}$) до температуры тела здорового человека ($t_k = 36,6^\circ\text{C}$)? Массу ртути считайте равной $m = 2 \text{ г}$. Будет ли это количество теплоты равно количеству теплоты, полученной термометром за время измерения температуры?
 - 3 При охлаждении медного паяльника массой $m = 200 \text{ г}$ до температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$ выделилось количество теплоты $Q = 30 \text{ кДж}$. До какой температуры был нагрет паяльник?
 - 4 Какое количество теплоты потребуется отвести от воздуха комнаты с температурой $t_0 = 30^\circ\text{C}$ и объёмом $V = 60 \text{ м}^3$, чтобы охладить его до температуры $t_k = 20^\circ\text{C}$? Плотность воздуха считайте постоянной и равной $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.
 - 5 Для нагревания металла массой $m = 100 \text{ г}$ от температуры $t_0 = 30^\circ\text{C}$ до температуры $T_k = 333 \text{ К}$ потребовалось количество теплоты $Q = 2,7 \text{ кДж}$. Определите удельную теплоёмкость этого металла.
 - 6 Соберите информацию о том, какое применение находят в технике и быту разные вещества с высокой и низкой удельной теплоёмкостью.

Для дополнительного изучения

§ 15

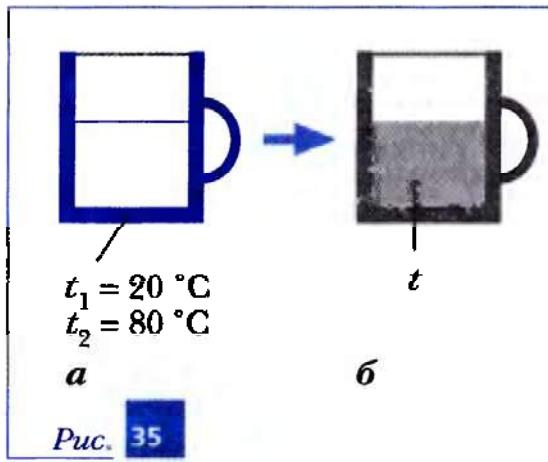
Расчёт количества теплоты при теплообмене.

Примеры решения задач

В процессе теплообмена между телами теплоизолированной системы их температуры изменяются до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие. Это явление лежит в основе решения задач о теплообмене. Все они решаются по одинаковой схеме. Чтобы научиться использовать эту схему, рассмотрим решение нескольких задач.

Задача 1. Определение температуры после установления теплового равновесия.

В алюминиевую кружку массой $M = 200 \text{ г}$, начальная температура которой $t_1 = 20^\circ\text{C}$, налили горячую воду массой $m = 100 \text{ г}$. Начальная темпера-



Rис. 35

тура воды $t_2 = 80^\circ\text{C}$ (рис. 35, *a*). Пренебрегая теплообменом с окружающей средой, определите температуру системы тел «кружка – вода» после установления теплового равновесия (рис. 35, *b*).

Решение.

Шаг 1. Прежде всего определим, какие тела участвуют в процессе теплообмена и является ли эта совокупность тел теплоизолированной термодинамической системой.

В нашем случае по условию задачи следует пренебречь теплообменом с окружающей средой. Поэтому в процессе теплообмена участвуют только два тела: кружка и находящаяся в ней вода.

Напомним, что в таком приближении система двух тел «кружка – вода» является теплоизолированной. С течением времени такая система должна прийти в состояние теплового равновесия (рис. 35, *b*). В этом состоянии конечные температуры обоих тел станут одинаковыми.

Шаг 2. Запишем выражения для теплоёмкостей тел, участвующих в процессе теплообмена.

Для этого необходимо массу каждого из тел умножить на удельную теплоёмкость вещества, из которого оно состоит. Поэтому теплоёмкость кружки $C_{\text{к}} = M \cdot c_{\text{ал}}$, а теплоёмкость воды $C_{\text{в}} = m \cdot c_{\text{в}}$. Здесь M и m – соответственно массы кружки и воды; а $c_{\text{ал}}$ и $c_{\text{в}}$ – соответственно удельные теплоёмкости алюминия и воды.

Шаг 3. Запишем выражения для изменений температур (разности между конечной и начальной температурами) для всех участвующих в теплообмене тел.

Как мы уже отмечали, после достижения теплового равновесия конечные температуры кружки и воды станут одинаковыми. Пусть эта конечная температура равна t . Тогда изменение температуры кружки будет равно $t - t_1$, а воды соответственно $t - t_2$.

В нашем случае $t_2 > t_1$. Поэтому установившаяся температура t будет удовлетворять условию $t_2 > t > t_1$. Иначе говоря, температура воды уменьшится (вода остынет), а температура кружки увеличится (кружка нагреется). Следовательно, изменение температуры кружки будет положительным: $t - t_1 > 0$, а изменение температуры воды, напротив, отрицательным: $t - t_2 < 0$.

Шаг 4. Запишем выражения для расчёта количества теплоты, полученных телами при теплообмене.

Количество теплоты, полученное кружкой, равно:

$$Q_1 = C_k \cdot (t - t_1) = c_{al} \cdot M \cdot (t - t_1) > 0, \text{ так как } t - t_1 > 0.$$

Таким образом, в процессе теплообмена количество теплоты, полученное кружкой, положительно. Кружка как изначально менее нагретое тело получала теплоту от воды.

Для количества теплоты, полученного водой, результат будет иным:

$$Q_2 = C_b \cdot (t - t_2) = c_b \cdot m \cdot (t - t_2) < 0, \text{ так как } t - t_2 < 0.$$

Отрицательное значение количества теплоты Q_2 говорит о том, что в процессе теплообмена более нагретая вода отдавала теплоту кружке.

Шаг 5. Составим уравнение теплового баланса.

По условию задачи в процессе теплообмена участвовали только два тела: кружка и вода. Поэтому количество теплоты, полученное кружкой, по модулю равно количеству теплоты,енному водой: $|Q_1| = |Q_2|$, т. е. сколько одно тело отдало, столько другое получило.

В соответствии с правилом знаков количество теплоты, полученное кружкой, положительно ($Q_1 > 0$). Напротив, количество теплоты, полученное водой, отрицательно ($Q_2 < 0$). Поэтому сумма полученных телами количеств теплоты равна нулю. Запишем это в виде уравнения, которое называют *уравнением теплового баланса*:

$$Q_1 + Q_2 = 0.$$

Таким образом, мы приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} Q_1 = c_{al} \cdot M \cdot (t - t_1), & (1) \text{ (количество теплоты, полученное кружкой)} \\ Q_2 = c_b \cdot m \cdot (t - t_2), & (2) \text{ (количество теплоты, полученное водой)} \\ Q_1 + Q_2 = 0. & (3) \text{ (уравнение теплового баланса)} \end{cases}$$

Шаг 6. Решаем систему уравнений.

Подставляя выражения (1) и (2) в уравнение (3) теплового баланса, получаем окончательное уравнение:

$$c_b \cdot m \cdot (t - t_2) + c_{al} \cdot M \cdot (t - t_1) = 0.$$

Раскрывая скобки, получаем:

$$c_b \cdot m \cdot t + c_{al} \cdot M \cdot t = c_b \cdot m \cdot t_2 + c_{al} \cdot M \cdot t_1,$$

$$\text{а потому } t = \frac{c_b \cdot m \cdot t_2 + c_{al} \cdot M \cdot t_1}{c_b \cdot m + c_{al} \cdot M}.$$

Подставляя значения удельных теплоёмкостей воды и алюминия из таблицы 2 и данные из условия задачи, имеем:

$$t = \frac{4,2 \cdot 0,1 \cdot 80 + 0,9 \cdot 0,2 \cdot 20}{4,2 \cdot 0,1 + 0,9 \cdot 0,2} = 62 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Ответ: температура тел при тепловом равновесии $t = 62 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Задача 2. Определение количества вещества, необходимого для достижения требуемой температуры смеси.

В ванну налили $m_1 = 100$ кг воды, имеющей температуру $t_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Какое количество воды с температурой $t_2 = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$ надо долить в ванну, чтобы температура воды в ней после установления теплового равновесия стала равной $t = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$? Теплоёмкость ванны считать равной нулю. Теплообменом воды с окружающей средой пренебречь.

Решение.

Шаг 1. Определяем, какие тела участвуют в процессе теплообмена. По условию задачи в процессе теплообмена участвуют первоначальная масса воды в ванной (тело 1) и доливаемая масса воды (тело 2). После достижения теплового равновесия температуры обоих тел станут одинаковыми, так как по условию задачи теплообмен с окружающей средой отсутствует.

Шаг 2. Запишем выражения для теплоёмкостей тел, участвующих в процессе теплообмена.

Теплоёмкость первоначальной массы воды $C_{в1} = m_1 \cdot c_в$, а теплоёмкость доливаемой воды $C_{в2} = m_2 \cdot c_в$.

Шаг 3. Запишем выражения для изменений температур (разности между конечной и начальной температурами) для всех участвующих в теплообмене тел:

$$t - t_1 > 0, \quad t - t_2 < 0.$$

Шаг 4. Запишем выражения для расчёта количеств теплоты, полученных телами при теплообмене:

$$Q_1 = C_{в1} \cdot (t - t_1) = c_в \cdot m_1 \cdot (t - t_1) > 0, \text{ так как } t - t_1 < 0;$$

$$Q_2 = C_{в2} \cdot (t - t_2) = c_в \cdot m_2 \cdot (t - t_2) < 0, \text{ так как } t - t_2 < 0.$$

Шаг 5. Составим уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 = 0.$$

Таким образом, мы приходим к системе уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 = c_b \cdot m_1 \cdot (t - t_1), \\ Q_2 = c_b \cdot m_2 \cdot (t - t_2), \\ Q_1 + Q_2 = 0. \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array}$$

Шаг 6. Решаем систему уравнений.

Подставляя выражения (1) и (2) в уравнение (3) теплового баланса, получаем:

$$\begin{aligned} c_b \cdot m_1 \cdot (t - t_1) + c_b \cdot m_2 \cdot (t - t_2) &= 0; \\ c_b \cdot m_1 \cdot (t - t_1) &= c_b \cdot m_2 \cdot (t_2 - t). \end{aligned}$$

Сокращая обе части уравнения на c_b , получаем:

$$m_2 \cdot (t_2 - t) = m_1 \cdot (t - t_1).$$

Откуда находим:

$$m_2 = \frac{m_1 \cdot (t - t_1)}{t_2 - t} = \frac{100 \cdot 20}{40} = 50 \text{ (кг)}.$$

Ответ: в ванну надо налить 50 кг воды, имеющей температуру $t_2 = 80^{\circ}\text{C}$.

Задача 3. Определение неизвестной удельной теплоёмкости вещества тела, участвующего в процессе теплообмена.

Ученику восьмого класса Диме Смирнову предложили оценить удельную теплоёмкость меди. Для этого ему дали медную кружку массой $m_1 = 200 \text{ г}$, имеющую комнатную температуру $t_1 = 20^{\circ}\text{C}$, и налили в неё кипяток массой $m_2 = 40 \text{ г}$. Удельная теплоёмкость воды c_2 и температура t_2 кипящей воды ему были известны. Через некоторое время температура медной кружки и температура воды стали одинаковыми и равными $t = 75^{\circ}\text{C}$. Этих данных достаточно для того, чтобы оценить удельную теплоёмкость меди. Помогите Диме это сделать.

Решение.

Шаг 1. Определим, какие тела участвуют в процессе теплообмена. Пренебрегая теплообменом с окружающей средой, можно считать, что в процессе теплообмена участвуют только два тела: медная кружка и вода.

Шаг 2. Запишем выражения для теплоёмкостей тел, участвующих в процессе теплообмена.

Теплоёмкость кружки $C_m = m_1 \cdot c_m$, а теплоёмкость воды $C_b = m_2 \cdot c_b$.

Шаг 3. Запишем выражения для изменений температур (разности между конечной и начальной температурами) для всех участвующих в теплообмене тел:

$$t - t_1 > 0, \quad t - t_2 < 0.$$

Шаг 4. Запишем выражения для расчёта количеств теплоты, полученных телами при теплообмене.

$$Q_1 = C_m \cdot (t - t_1) = c_m \cdot m_1 \cdot (t - t_1) > 0, \text{ так как } t - t_1 > 0;$$

$$Q_2 = C_b \cdot (t - t_2) = c_b \cdot m_2 \cdot (t - t_2) < 0, \text{ так как } t - t_2 < 0.$$

Шаг 5. Составим уравнение теплового баланса.

$$Q_1 + Q_2 = 0.$$

Таким образом, мы приходим к системе уравнений:

$$\begin{cases} Q_1 = c_m \cdot m_1 \cdot (t - t_1), & (1) \\ Q_2 = c_b \cdot m_2 \cdot (t - t_2), & (2) \\ Q_1 + Q_2 = 0. & (3) \end{cases}$$

Шаг 6. Решаем систему уравнений.

Подставляя выражения (1) и (2) в уравнение (3), получаем:

$$c_b \cdot m_2 \cdot (t - t_2) + c_m \cdot m_1 \cdot (t - t_1) = 0.$$

Откуда находим:

$$c_m \cdot m_1 \cdot (t - t_1) = c_b \cdot m_2 \cdot (t_2 - t);$$

$$c_m = \frac{c_b \cdot m_2 \cdot (t_2 - t)}{m_1 \cdot (t - t_1)} = \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot (100 - 75)}{0,2 \cdot (75 - 20)} \approx 380 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

Ответ: удельная теплоёмкость меди равна 380 Дж/(кг · К).

Упражнения

При выполнении заданий используйте данные таблицы 2.

- 1 В железный бак массой $m = 65$ кг, нагретый лучами Солнца до температуры $t_1 = 30$ °С, налили из колодца холодную воду массой $M = 300$ кг, имевшую температуру $t_2 = 5$ °С. К вечеру бак с водой нагрелся до температуры $T = 300$ К. Оцените количество теплоты, полученное баком с водой.
- 2 На сколько градусов нагреется кусок алюминия массой $m = 20$ кг, если ему сообщить такое же количество теплоты, какое необходимо для повышения температуры воды массой $M = 800$ г на $T = 80$ К?

- *3 Для ванны нужно приготовить $m = 350$ кг воды, температура которой $t = 36$ °С. Сколько воды нужно взять для этого из горячего и холодного кранов, если температура воды в горячем кране $t_1 = 76$ °С, а в холодном — $t_2 = 6$ °С? Теплообменом воды с окружающими телами можно пренебречь.
- 4 Проанализируйте в группе ход решения задач в тексте параграфа (задачи 1–3). Посчитайте для каждой из задач число тел, участвующих в теплообмене. Сопоставьте эти числа с количеством слагаемых в уравнении теплового баланса. Сформулируйте вывод и сделайте краткое сообщение в классе.

§ 16

Удельная теплота сгорания топлива

До сих пор при изучении причин изменения внутренней энергии термодинамической системы мы ограничивались процессами, в которых составляющие эту систему частицы не изменяли своего строения, т. е. в изученных нами процессах не происходили химические реакции.

Попытаемся разобраться, что может происходить с энергией термодинамической системы при протекании в ней химической реакции.

Допустим, в процессе химической реакции молекула вещества распадается. Образовавшиеся «осколки» молекулы, удаляясь друг от друга, преодолевают силы взаимного притяжения. В результате они совершают работу против этих сил. Поэтому такая реакция может происходить только с поглощением энергии извне. Если над телами системы не совершают работу внешние силы, то эта реакция сопровождается поглощением количества теплоты извне или уменьшением температуры этой системы.

Если же в процессе химической реакции новая молекула образуется в результате объединения нескольких частей, то ситуация выглядит иначе. В этом случае при сближении этих частей силы взаимного притяжения между ними совершают положительную работу. Если термодинамическая система при этом не совершает работу, то такая реакция сопровождается передачей количества теплоты окружающим систему телам или увеличением температуры этой системы.

Химические реакции, в которых термодинамическая система поглощает теплоту, называют эндотермическими.

Напротив, химические реакции, в которых термодинамическая система выделяет теплоту, называют экзотермическими.

Ярким примером экзотермической реакции является горение топлива.

■ Горение топлива — экзотермическая реакция (сопровождается выделением теплоты).

Чем же определяется количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива?

Из повседневного опыта вы знаете, что чем больше вы сжигаете дров (угля, керосина и т. п.), тем большее количество теплоты выделяется при этом. Например, при сгорании 2 кг дров выделяется в два раза большее количество теплоты, чем при сгорании 1 кг таких же дров.

■ Количество теплоты, выделяющееся при сгорании топлива, пропорционально массе этого топлива.

Это легко понять с точки зрения молекулярной теории. Действительно, в 2 кг вещества в два раза больше молекул (атомов), чем в 1 кг того же вещества. Поэтому при протекании химической реакции, например при горении, изменение внутренней энергии термодинамической системы, состоящей из 2 кг вещества, будет в два раза больше, чем при сгорании 1 кг того же вещества. Следовательно, и количество теплоты, выделившееся в первом случае, будет в два раза большим.

Кроме того, эксперименты показывают, что при сгорании, например, 1 кг бензина выделяется почти в 1,7 раза большее количество теплоты, чем при сгорании 1 кг каменного угля.

■ При сгорании разных видов топлива одной и той же массы выделяется разное количество теплоты.

Это так же легко понять, если вспомнить, что различные вещества состоят из разных молекул. При образовании разных молекул, очевидно, может выделяться разное количество теплоты.

Количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг данного вещества, называют удельной теплотой сгорания этого вещества.

Удельную теплоту сгорания обозначают буквой q . Единица удельной теплоты сгорания в СИ — джоуль на килограмм ($\text{Дж}/\text{кг}$).

Примерные значения удельной теплоты сгорания некоторых веществ приведены в таблице 3.

Определим количество теплоты Q , которое выделится при полном сгорании, например, $m = 5 \text{ кг}$ природного газа. Из таблицы видно, что удельная теплота сгорания природного газа $q = 44 \text{ МДж}/\text{кг}$. Следовательно, при сгорании $m = 5 \text{ кг}$ выделится количество теплоты:

Таблица 3

Топливо	q , МДж/кг	Топливо	q , МДж/кг
Водород	120	Порох	3,8
Природный газ	44	Дрова сухие	10
Бензин	46	Торф	14
Керосин	46	Каменный уголь	27
Нефть	44	Антрацит	30

$$Q = q \cdot m = 44 \cdot 10^6 \cdot 5 = 220 \text{ (МДж).}$$

Таким образом, для определения количества теплоты Q , выделяющегося при полном сгорании топлива массой m , необходимо удельную теплоту сгорания q этого топлива умножить на его массу:

$$Q = q \cdot m.$$

Воспользуемся приобретёнными знаниями для решения задач.

Задача 1. Автомобиль массой $M = 1$ т, тронувшись с места, разогнался по горизонтальной дороге до скорости $v = 108$ км/ч. Определите количество бензина, которое полностью сгорело при этом в двигателе автомобиля, если известно, что на разгон автомобиля идёт 20 % ($k = 0,2$) энергии, выделяющейся при сгорании бензина.

Решение.

Увеличение кинетической энергии при разгоне автомобиля равно $K = \frac{M \cdot v^2}{2}$. Энергия, выделившаяся при сгорании m кг бензина:

$$Q = q \cdot m,$$

где q – удельная теплота сгорания бензина. По условию задачи $K = k \cdot Q = k \cdot q \cdot m$. Поэтому с учётом того, что $108 \text{ км/ч} = 30 \text{ м/с}$, получаем:

$$m = \frac{K}{k \cdot q} = \frac{0,5 M \cdot v^2}{k \cdot q} = \frac{0,5 \cdot 10^3 \cdot 30^2}{0,2 \cdot 46 \cdot 10^6} \approx 49 \cdot 10^{-3} \text{ (кг)}.$$

Ответ: масса бензина равна 49 г.

Задача 2. Определите массу M дров, которые сожгли для нагревания $V = 10$ л воды от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Считайте, что на нагревание воды потрачено 10 % ($k = 0,1$) от количества теплоты, выделившегося при сгорании дров.

Решение.

Масса нагреваемой воды $m = \rho \cdot V$, где ρ – плотность воды (1 кг/л). Поэтому количество теплоты, полученное водой:

$$Q_1 = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1) = c \cdot \rho \cdot V \cdot (t_2 - t_1).$$

При сжигании дров выделяется количество теплоты $Q_2 = q \cdot M$, где q – удельная теплота сгорания дров. Из условия задачи получаем уравнение: $Q_1 = Q_2 \cdot k$. Подставляя в это уравнение выражения для Q_1 и Q_2 , находим искомую массу дров:

$$M = \frac{c \cdot \rho \cdot V \cdot (t_2 - t_1)}{k \cdot q} = \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 80}{10 \cdot 10^6 \cdot 0,1} = 3,36 \text{ (кг)}.$$

Ответ: масса дров равна 3,36 кг.

Итоги

Химические реакции, при которых термодинамическая система поглощает теплоту, называют эндотермическими.

Химические реакции, при которых термодинамическая система выделяет теплоту, называют экзотермическими.

Примером экзотермической реакции является горение топлива.

Количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг данного вещества, называют удельной теплотой сгорания этого вещества.

Единица удельной теплоты сгорания в СИ – джоуль на килограмм (Дж/кг).

Для определения количества теплоты Q , выделяющегося при полном сгорании топлива, необходимо удельную теплоту сгорания q этого топлива умножить на его массу m :

$$Q = q \cdot m.$$

Вопросы

- 1 Какие реакции называют эндотермическими, а какие экзотермическими? Приведите пример экзотермической реакции.

- Что называют удельной теплотой сгорания топлива? Как называют в СИ единицу удельной теплоты сгорания?
- Как вычислить количество теплоты, выделившееся при сгорании определённого количества известного топлива?

Упражнения

- Заряд игрушечной ракеты массой $M = 300$ г состоит из $m = 2$ г пороха. На какую высоту сможет взлететь ракета, если на работу по её подъёму пойдёт 10 % ($k = 0,1$) от энергии, выделившейся при полном сгорании заряда пороха?
- Сколько торфа нужно скечь в печи, чтобы нагреть воздух в комнате объёмом $V = 60 \text{ м}^3$ от температуры $t_0 = 10^\circ\text{C}$ до температуры $t_k = 20^\circ\text{C}$, если на его нагревание идёт 10 % ($k = 0,1$) выделяющейся при сгорании торфа энергии? Плотность воздуха считайте равной $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- Соберите информацию о производстве и потреблении различных видов топлива в нашей стране, их долях в производстве энергии, а также об экологических последствиях их использования.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ТЕОРИИ

1. Любое вещество состоит из мельчайших частиц, которые можно считать неизменными.
2. Эти частицы непрерывно хаотически движутся друг относительно друга. Такое движение часто называют тепловым движением. Темп хаотического движения тем больше, чем сильнее нагрето вещество.
3. Частицы вещества взаимодействуют друг с другом. Если расстояние между частицами больше определённого, то преобладают силы притяжения, если меньше — отталкивания.

Установлено, что все молекулы состоят из атомов. Все атомы состоят из ещё более мелких (элементарных) частиц: протонов, нейтронов и электронов.

Вещество в зависимости от внешних условий может находиться в различных агрегатных состояниях: *газообразном, жидкок и твёрдом*.

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Совокупность очень большого числа частиц называют термодинамической системой.

Сумму кинетических энергий хаотического движения всех молекул системы и потенциальных энергий их взаимодействия друг с другом называют внутренней энергией термодинамической системы:

$$U = K + P.$$

Внутреннюю энергию термодинамической системы можно изменить только двумя способами: 1) совершить над ней механическую работу; 2) передать ей определённое количество теплоты.

Изменение внутренней энергии тела (термодинамической системы) можно описать уравнением:

$$U_k = U_0 + A + Q,$$

где A — работа, совершенная над телом, Q — количество теплоты, переданной телу, с учётом правила знаков.

Правило знаков: если работу совершают над системой, то значение A принимают положительным, если же работу совершает сама система, то значение работы A принимают отрицательным; если система получает количество теплоты Q , то значение Q принимают положительным, если же система отдаёт количество теплоты Q , то значение Q принимают отрицательным.

При этом работа, совершённая над системой, рассчитывается в системе отсчёта, где термодинамическая система в целом покоится.

Приведённое уравнение является математической формой записи закона сохранения энергии при тепловых процессах (первого закона термодинамики).

Закон сохранения энергии при тепловых процессах

Энергия не может появиться из ничего или исчезнуть бесследно. Возможен лишь её переход от одного тела к другому или из одного вида в другой.

Нулевой закон термодинамики

Полностью изолированная термодинамическая система с течением времени самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия.

Температура – физическая величина, характеризующая степень нагретости термодинамической системы, находящейся в состоянии теплового (термодинамического) равновесия.

За единицу абсолютной температуры принят 1 градус Кельвина (1 К), который равен 1 градусу Цельсия (1 °C):

$$T = t + 273.$$

Если однородное тело в процессе теплообмена получает количество теплоты Q , то изменение его температуры

$$\Delta t = t_{\text{к}} - t_{\text{н}} = \frac{Q}{C} = \frac{Q}{m \cdot c},$$

где C – теплоёмкость тела массой m , а c – удельная теплоёмкость вещества, из которого оно состоит.

При сгорании топлива массой m выделяется количество теплоты $Q = q \cdot m$, где q – удельная теплота сгорания этого топлива.

Изменения агрегатных состояний вещества

Изменения агрегатных состояний вещества — очень распространённые явления. Их можно часто наблюдать в природе. Поэтому хорошо известно, что в зависимости от внешних условий одно и то же вещество может находиться в различных агрегатных состояниях: твёрдом, жидким или газообразном.

Строение молекулы вещества не зависит от того, в каком состоянии оно находится. Однако, как вы знаете, в твёрдом, жидком и газообразном состояниях молекулы вещества движутся по-разному, и, кроме того, в различных агрегатных состояниях различно и взаимодействие молекул друг с другом. Следовательно, между внутренней энергией термодинамической системы, содержащей неизменное количество молекул какого-либо вещества, и агрегатным состоянием этого вещества существует взаимосвязь.

Рассмотрим процессы изменения агрегатных состояний вещества, попробуем понять их механизм и объяснить происходящие с веществом изменения с точки зрения молекулярной теории.

§17

Испарение и конденсация

Проведём эксперимент: поместим на стеклянную пластинку капли эфира, спирта и воды. С течением времени капля эфира будет уменьшаться, пока не исчезнет полностью. Понятно, что молекулы эфира не исчезли бесследно. Эфир превратился в *пар* (испарился), т. е. перешёл в газообразное состояние, и его молекулы рассеялись в окружающем пространстве. Несколько позднее превратится в пар весь спирт, а через какое-то время и вода.

Испарением называют переход вещества из жидкого (или твёрдого) состояния в газообразное, который происходит с поверхности жидкости (или твёрдого тела).

Эксперименты показывают, что все без исключения жидкости испаряются. Однако одни жидкости, например эфир или бензин, испаряются быстрее; другие, например ртуть, испаряются медленнее.

Испаряться могут и твёрдые тела. Можно наблюдать, например, испарение твёрдого нафтилина (из-за чего мы чувствуем его запах), йода или сухого льда (двуокиси углерода CO_2).

В чём же заключается механизм испарения с точки зрения молекулярной теории?

Как вы уже знаете, молекулы жидкости непрерывно хаотически движутся. При этом силы взаимного притяжения не позволяют всем молекулам жидкости разлететься в разные стороны, как это происходит с молекулами газа. Тем не менее отдельным молекулам, оказавшимся у поверхности жидкости, удаётся покинуть её. Каким же образом это происходит?

Дело в том, что в жидкости скорости хаотического движения молекул различны. Поэтому среди них всегда имеются «достаточно быстрые». Поясним, что означают слова «достаточно быстрые». Вылетевшая с поверхности жидкости молекула, удаляясь, испытывает, во-первых, притяжение со стороны оставшихся «у неё за спиной» молекул на поверхности и, во-вторых, сопротивление со стороны газа, который находится над жидкостью.

Движение такой молекулы можно сравнить с движением брошенного вверх с поверхности Земли камня. Скорость камня под действием силы тяжести и силы сопротивления воздуха по мере движения вверх уменьшается. Работа этих сил приводит к уменьшению его кинетической энергии. Чем меньше начальная скорость (и соответственно начальная кинетическая энергия) камня, тем быстрее он остановится и упадёт вниз.

Похожим образом работа сил притяжения поверхности жидкости приводит к уменьшению кинетической энергии вылетевшей «наружу» молекулы. Поэтому если начальная скорость и соответственно начальная кинетическая энергия такой молекулы недостаточно велики, то она возвращается в жидкость (как возвращается на Землю брошенный вверх камень). Однако «достаточно быстрые» молекулы могут удалиться от поверхности так, что перестанут испытывать притяжение оставшихся в жидкости молекул. Ведь силы притяжения между молекулами быстро убывают с увеличением расстояния между ними.

! Так как скорости молекул в жидкости при хаотическом движении различны, отдельные молекулы, которые находятся у поверхности и обладают большой кинетической энергией, могут преодолеть силы притяжения и покинуть жидкость.

Оставшиеся в жидкости молекулы непрерывно соударяются друг с другом. В результате этих соударений их скорости непрерывно и хаотически изменяются. Поэтому среди них вновь появляются «достаточно быстрые», которые также могут покинуть жидкость. По этой причине *процесс испарения любой жидкости происходит постоянно при любой температуре*. Так, например, лужи после дождя высыхают и в жаркую погоду, и в прохладную.

Скорости испарения различных жидкостей отличаются. Это показал проведённый нами эксперимент с каплями эфира, спирта и воды. Теперь мы можем объяснить, почему так происходит.

Чем меньше силы взаимного притяжения между молекулами жидкости, тем меньшая начальная кинетическая энергия требуется молекуле, чтобы вылететь с её поверхности. Поэтому в жидкости с меньшими силами притяжения между молекулами найдётся больше «достаточно быстрых» молекул, способных вылететь из неё. В результате такая жидкость будет испаряться быстрее.

Мы можем также объяснить ещё один интересный экспериментальный факт.

При испарении жидкости наблюдается её охлаждение. Если в жаркий день смочить руку водой, то вы почувствуете холод. Ощущение холода усиливается, если ускорить процесс испарения: например, помахать рукой или заменить воду более «летучей» жидкостью — спиртом или эфиром.

Так как при испарении из жидкости вылетают наиболее «быстрые» молекулы, температура жидкости уменьшается.

Уменьшается также и кинетическая энергия молекул, вылетевших из жидкости, так как по мере их удаления от поверхности происходит переход кинетической энергии в потенциальную энергию взаимодействия с оставшимися в жидкости молекулами. (Точно так же при взлёте камня с поверхности Земли его кинетическая энергия переходит в потенциальную энергию взаимодействия с Землёй.)

! Таким образом, если к жидкости и её пару не подводить энергию извне, то при испарении температура всей термодинамической системы, состоящей из жидкости и образующегося над ней пара, уменьшается.

Чтобы охлаждения жидкости и её пара при испарении не происходило, к ним необходимо подводить энергию извне, например передавать необходимое количество теплоты. Так, капля испарявшегося эфира получала теплоту от стеклянной пластинки, на которой она находилась, и от окружающего её воздуха.

Вылетевшие с поверхности жидкости молекулы движутся хаотично. Сталкиваясь с молекулами воздуха и между собой, они изменяют направле-

ии своего движения и в результате могут вновь вернуться в жидкость. Кроме того, в воздухе над жидкостью всегда есть пар, молекулы которого также могут влететь в жидкость. Следовательно, одновременно с испарением всегда происходит и обратный процесс — конденсация.

Конденсацией называют переход вещества из газообразного состояния в жидкое (или твёрдое).

Испарение и конденсация постоянно «конкурируют» между собой.

Конденсация сопровождается нагреванием жидкости. Это легко объяснить. Молекулу, возвращающуюся в жидкость под действием силы притяжения со стороны жидкости, можно сравнить с падающим на Землю камнем. Как и у падающего камня, скорость такой молекулы будет увеличиваться. Поэтому будет увеличиваться и её кинетическая энергия. Потенциальная энергия взаимодействия молекулы с жидкостью при этом будет уменьшаться. В результате будет увеличиваться и темп хаотического (теплового) движения всей термодинамической системы «пар — жидкость». Следовательно, такая термодинамическая система будет нагреваться. Для поддержания постоянной температуры системы «пар — жидкость» при конденсации необходимо отводить от неё энергию. Например, можно забирать у неё необходимое количество теплоты.

Итоги

Испарением называют переход вещества из жидкого (или твёрдого) состояния в газообразное, который происходит с поверхности жидкости (или твёрдого тела).

При испарении температура термодинамической системы, состоящей из жидкости и образующегося над ней пара, уменьшается.

Чтобы охлаждения жидкости при испарении не происходило, необходимо подводить к ней энергию извне (например, передавать ей определённое количество теплоты).

Конденсацией называют переход вещества из газообразного состояния в жидкое (или твёрдое).

Конденсация сопровождается нагреванием жидкости (или твёрдого тела).

Для поддержания при конденсации постоянной температуры системы необходимо отводить от неё энергию (например, забирать от неё определённое количество теплоты).

Вопросы

- 1 Что называют испарением?
- 2 В чём состоит механизм испарения (конденсации) с точки зрения молекулярной теории?
- 3 Почему одни жидкости испаряются быстрее, а другие медленнее?
- 4 Как изменяется кинетическая энергия молекулы, вылетающей с поверхности жидкости? Как при этом изменяется потенциальная энергия её взаимодействия с молекулами, оставшимися в жидкости?
- 5 Почему при испарении происходит охлаждение?
- 6 Что называют конденсацией?
- 7 Почему процесс конденсации сопровождается нагреванием?
- 8 Каким образом можно поддерживать постоянной температуру системы «пар — жидкость» при испарении?
- 9 Каким образом можно поддерживать постоянной температуру системы «пар — жидкость» при конденсации?

Задания

- 1 Объясните, почему при испарении воды из открытого стакана её температура становится немного ниже комнатной.
- 2 В жаркий летний день в комнате разбрызгали воду. Станет ли в комнате прохладнее? Почему?
- 3 Объясните, для чего во время жары собака высовывает язык.

§ 18 Скорость процесса испарения. Насыщенный пар

Выясним, от чего зависит скорость испарения жидкости и как сделать этот процесс более интенсивным. Теперь, когда рассмотрен механизм испарения с точки зрения молекулярной теории, мы можем ответить на эти вопросы.

Возможны несколько способов ускорения этого процесса.

Первый способ. Можно увеличить число «достаточно быстрых» молекул в жидкости. Для этого *надо её нагреть*. При увеличении температуры жидкости увеличивается кинетическая энергия хаотического (теплового) движения её молекул, а значит, и число «достаточно быстро» движущихся молекул, способных вылететь из неё.

! Для того чтобы процесс испарения жидкости стал более интенсивным, её можно нагреть.

Понятно, что охлаждение жидкости, напротив, приводит к замедлению процесса испарения. Это подтверждается и экспериментально: в жаркую погоду лужи высыхают быстрее, чем в холодную.

Второй способ. Можно увеличить число «достаточно быстрых» молекул, находящихся у поверхности жидкости. Для этого можно *увеличить площадь открытой поверхности жидкости*.

Действительно, легко наблюдать, что жидкость, разлитая по большой поверхности, испаряется гораздо быстрее, чем та же жидкость, налитая в сосуд с узким горлышком.

! Следовательно, скорость испарения жидкости возрастает при увеличении площади её открытой поверхности и уменьшается при уменьшении этой площади.

Прежде чем переходить к третьему способу, обсудим, как «конкурируют» между собой процессы испарения и конденсации.

Пусть плотность пара над поверхностью жидкости мала. Тогда число испаряющихся с поверхности жидкости молекул будет больше числа молекул, возвращающихся в жидкость за то же время, и *испарение будет преобладать над конденсацией*.

В этом случае пар над поверхностью жидкости называют *ненасыщенным*.

Напротив, если плотность пара очень велика, то число молекул, возвращающихся в жидкость, будет превышать число покидающих её молекул за то же время. *Конденсация будет преобладать над испарением*.

В этом случае пар над поверхностью жидкости называют *перенасыщенным*.

Проведём эксперимент. Нальём жидкость в сосуд, частично заполнив его, и плотно закроем крышку. Будем поддерживать постоянной температуру сосуда с жидкостью. Вначале испарение будет преобладать над конденсацией. Масса жидкости будет уменьшаться, а масса пара над ней — увеличиваться. С течением времени этот процесс будет идти всё медленнее и медленнее. Это объясняется тем, что при увеличении плотности пара над поверхностью жидкости увеличивается и число молекул, возвращающихся в неё. К некоторому моменту времени плотность пара над поверхностью жидкости станет настолько большой, что число возвращающихся в жидкость молекул в среднем будет равно числу вылетающих из жидкости молекул. Наступит *динамическое равновесие* между жидкостью и её паром. Масса жидкости после этого перестанет изменяться, несмотря на то что

продолжаются и испарение, и конденсация. Не будет изменяться и плотность пара над поверхностью жидкости.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным.

Равновесие между жидкостью и её насыщенным паром в закрытом сосуде можно нарушить, если изменить температуру всей системы.

При увеличении температуры (нагревании) число вылетающих из жидкости молекул опять станет больше числа возвращающихся в жидкость молекул. Поэтому плотность пара будет увеличиваться до тех пор, пока по прошествии некоторого времени не установится новое динамическое равновесие между жидкостью и её паром. Этот пар также будет насыщенным, но уже при более высокой температуре. Его плотность будет больше плотности пара, который был насыщенным ранее. Таким образом, мы приходим к выводу:

! чем выше температура насыщенного пара, тем больше его плотность.

Ясно, что при уменьшении температуры динамическое равновесие в закрытом сосуде сместится в обратную сторону. Действительно, вначале после уменьшения температуры конденсация будет преобладать над испарением (объясните почему). Поэтому плотность пара будет уменьшаться. Но через некоторое время наступит новое динамическое равновесие. При этом плотность насыщенного пара станет меньше, чем прежде, и будет соответствовать новой, меньшей температуре.

Теперь мы можем предложить ещё один способ увеличения скорости испарения.

Третий способ. Для ускорения испарения нужно постараться уменьшить число молекул пара, возвращающихся в жидкость. С этой целью *необходимо удалять пары жидкости, образующиеся над её поверхностью*.

! Скорость испарения жидкости возрастёт, если удалять пары жидкости над её поверхностью.

Это подтверждают и эксперименты. Мы дуем на горячую пищу, например суп, чтобы ускорить процесс испарения жидкости и соответственно быстрее её охладить.

Итоги

Для ускорения процесса испарения жидкости можно:

- 1) нагреть её;
- 2) увеличить площадь её открытой поверхности;
- 3) удалять образующиеся над поверхностью жидкости пары.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным.

Если число вылетающих с поверхности жидкости молекул превышает число возвращающихся в неё (испарение преобладает над конденсацией), то пар над поверхностью жидкости называют *ненасыщенным*.

Если число молекул, возвращающихся в жидкость, превышает число молекул, покидающих её за то же время (конденсация преобладает над испарением), то такой пар называют *перенасыщенным*.

Чем выше температура насыщенного пара, тем больше его плотность.

Вопросы

- 1 Как ускорить процесс испарения жидкости? Какими способами можно это сделать?
- 2 Где быстрее испаряется вода, в стакане или в блюдце?
- 3 Почему чай быстрее остывает, если на него дуть?
- 4 Какой пар называют насыщенным, ненасыщенным, перенасыщенным?
- *5 Как изменяется плотность насыщенного пара при увеличении (уменьшении) температуры? Дайте ответ с точки зрения молекулярной теории.
- *6 Можно ли нарушить равновесие между жидкостью и её насыщенным паром? Как это сделать? Поясните свой ответ.

Задания

- 1 Объясните, что происходит, когда в жаркую погоду обмахиваются веером.
- 2 Объясните, когда и как лучше сушить бельё: а) в жаркую погоду или в холодную; б) в сухую погоду или в сырую; в) на ветру или в закрытом помещении. Опишите самые благоприятные и самые неблагоприятные условия для сушки белья. Ответ обоснуйте.
- 3 Придумайте и проведите эксперименты, доказывающие, что скорость испарения жидкости увеличивается при увеличении площади её свободной поверхности, температуры и при удале-

ний образующихся над её поверхностью паров. Опишите цель, гипотезу, условия каждого эксперимента, его ход и результаты исследования. Сделайте сообщение в классе.

§ 19

Влажность воздуха

Окружающий нас воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара. В этом легко убедиться, если в тёплое помещение внести сильно охлаждённый предмет. Через некоторое время на его поверхности образуются капельки воды (роса). Они появляются в результате конденсации водяных паров, находящихся в воздухе, при их контакте с холодным предметом.



Чем больше водяных паров в воздухе, тем больше его влажность.

Влажность воздуха принято описывать двумя способами: при помощи *абсолютной* и *относительной* влажности.

Абсолютной влажностью воздуха называют плотность водяного пара, содержащегося в этом воздухе.

Таким образом, абсолютная влажность численно равна массе водяного пара, содержащегося в одном кубическом метре воздуха. Абсолютная влажность позволяет рассчитать количество (массу) водяного пара в любом заданном объёме воздуха. Для этого надо абсолютную влажность умножить на объём воздуха.

Понятие относительной влажности воздуха вводят для того, чтобы оценить близость водяного пара в воздухе к насыщению.

Относительной влажностью воздуха φ называют физическую величину, равную отношению плотности ρ водяного пара в этом воздухе к плотности насыщенного водяного пара ρ_n при той же температуре, выраженному в процентах:

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100 \%$$

Вы уже знаете (см. § 18), что чем ниже температура воздуха, тем меньшее количество водяных паров требуется для образования насыщенного пара. Иначе говоря, при понижении температуры плотность насыщенного пара ρ_n уменьшается. Поэтому если воздух с абсолютной влажностью ρ

охлаждать, то относительная влажность воздуха $\varphi = \frac{P}{P_n} \cdot 100\%$ будет увеличиваться, пока не достигнет 100 %. С этого момента находящийся в воздухе водяной пар станет насыщенным. При дальнейшем охлаждении начнётся его конденсация. Именно этим объясняется, что вечером, после тёплого дня, когда воздух остывает, образуется туман и выпадает роса.

Температуру, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называют точкой росы.

Для измерения влажности воздуха применяют специальные приборы.

Наиболее часто для этой цели используют прибор, называемый *психрометром* (рис. 36). Он состоит из двух термометров. Один термометр измеряет температуру воздуха. У другого термометра колбочка обмотана тканью, которая смачивается водой из резервуара. Поскольку вода с ткани испаряется, этот термометр охлаждается. Быстрота испарения воды зависит от влажности воздуха и его температуры. Чем больше относительная влажность, тем менее интенсивно идёт испарение, и разность показаний двух термометров будет меньше. Поэтому, зная температуры «сухого» и «мокрого» термометров, по специальным таблицам определяют относительную влажность воздуха в месте нахождения психрометра.

Действие другого прибора, *волосного гигрометра* (рис. 37), основано на свойстве обезжиренного человеческого волоса изменять свою длину при изменении относительной влажности. С увеличением относительной влажности длина волоса увеличивается, а при уменьшении — уменьшается. Изменение длины волоса приводит к повороту стрелки на шкале прибора. Это позволяет определить относительную влажность.

Определить абсолютную влажность воздуха можно, измерив точку росы. Предназначенные для этого приборы называют *конденсационными гигрометрами*. Основным элементом такого прибора является металлическая коробочка, одна из стенок которой хорошо отполирована. Внутрь этой коробочки наливают легко испаряющуюся жидкость (обычно эфир). При принудительном продувании через коробочку воздуха жидкость интенсивно испаряется и её температура понижается. Температуру жидкости измеряют с помощью термометра. Воздух через жидкость продувают до тех пор, пока на полирован-

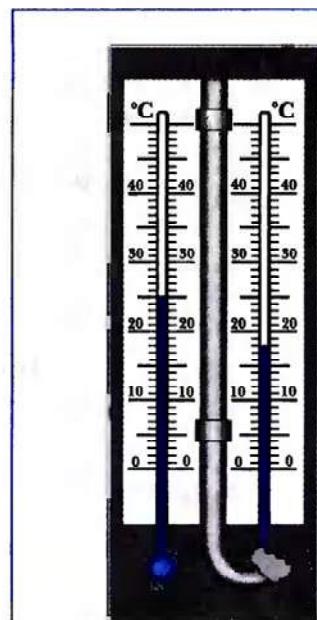


Рис. 36 Психрометр

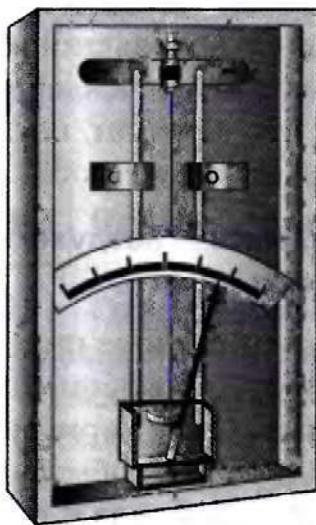


Рис. 37

При изменении влажности воздуха чувствительный элемент гигрометра — человеческий волос — изменяет свою длину

ной поверхности коробочки не появится роса. Таким образом определяют точку росы. Используя таблицу зависимости плотности насыщенных паров воды от температуры, определяют абсолютную влажность.

Влажность воздуха имеет огромное значение как для научных исследований при изучении явлений, происходящих в атмосфере, так и для различных производственных процессов, а также в быту. Наиболее благоприятной для человеческого организма является относительная влажность 50–60 %. ■

К

Человек плохо переносит высокую влажность воздуха, особенно если она сопровождается повышенной температурой воздуха. В таких «тропических» условиях замедляется процесс испарения влаги с поверхности кожи и нарушается теплообмен организма с окружающей средой.

Итоги

Воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара. Это количество определяет степень влажности воздуха.

Абсолютной влажностью воздуха называют плотность водяного пара, содержащегося в этом воздухе.

Относительной влажностью воздуха ϕ называют физическую величину, равную отношению плотности ρ водяного пара в этом воздухе к плотности насыщенного водяного пара ρ_n при той же температуре, выраженному в процентах:

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_n} \cdot 100 \, \%$$

Температуру, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называют **точкой росы**.

Вопросы

1 Какими физическими величинами характеризуют степень влажности воздуха?

- 2 Что называют абсолютной влажностью воздуха? В каких единицах её выражают?
- 3 Что называют относительной влажностью воздуха?
- 4 Увеличивается, уменьшается или остаётся без изменения плотность насыщенного пара при понижении температуры?
- 5 Из-за чего образуется туман и выпадает роса?
- 6 Как устроен волосной гигрометр? Что такое психрометр? Из чего он состоит? Как определяют точку росы при помощи конденсационного гигрометра?

Упражнения

- 1 Объясните, почему стёкла в автомобиле в холодную погоду запотевают с внутренней стороны.
- 2 Показания сухого и влажного термометров у психрометра совпадают и равны 20°C . Найдите относительную влажность воздуха, используя эти показания.
- 3 Найдите массу водяного пара в жилой комнате, сауне и русской бане. Известно, что плотности водяного пара в жилой комнате, сауне и парилке русской бани равны соответственно $\rho_k = 10 \text{ г}/\text{м}^3$, $\rho_c = 60 \text{ г}/\text{м}^3$, $\rho_b = 200 \text{ г}/\text{м}^3$. Объёмы этих помещений примите равными соответственно $V_k = 50 \text{ м}^3$, $V_c = 20 \text{ м}^3$, $V_b = 30 \text{ м}^3$.
- 4 По радио сообщили, что температура воздуха на улице $t = 10^{\circ}\text{C}$, а его относительная влажность $\phi = 80\%$. Определите абсолютную влажность воздуха на улице, если известно, что плотность насыщенного пара при температуре $t = 10^{\circ}\text{C}$ равна $\rho_n = 9,4 \text{ г}/\text{м}^3$.
- * 5 Известно, что плотность насыщенного водяного пара при $t = 20^{\circ}\text{C}$ равна $\rho_n = 17,3 \text{ г}/\text{м}^3$. Найдите массу водяного пара в комнате объёмом $V = 60 \text{ м}^3$, если известно, что температура воздуха в комнате $t = 20^{\circ}\text{C}$, а его относительная влажность $\phi = 40\%$.
- 6 Опишите погодные условия, при которых возможно образование инея на деревьях, домах и т. п.
- ✓ 7 Используя материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Относительная_влажность, сделайте сообщение о влиянии паров воды на живые организмы.
- ✓ 8 Используя психрометр, определите влажность воздуха в различных помещениях школы. Найдите информацию о нормах влажности воздуха для учебных, жилых и других помещений. Предложите меры по обеспечению этих норм.

§ 20

Удельная теплота парообразования. Кипение

Вы знаете, что при испарении жидкость охлаждается. Чтобы этого не происходило, для поддержания постоянной температуры жидкости ей необходимо передавать определённое количество теплоты. Очевидно, что это количество теплоты прямо пропорционально числу молекул, покинувших жидкость. Значит, *переданное жидкости количество теплоты должно быть пропорционально массе жидкости, превратившейся в пар.*

Силы взаимного притяжения между молекулами разных жидкостей различны. Поэтому при вылете молекул из разных жидкостей в процессе испарения этими силами совершаются разные работы. (Отметим, что эта работа зависит и от внешнего давления.)



Следовательно, для превращения в пар одинаковых масс разных жидкостей требуется разная энергия, а значит, и разное количество теплоты.

Физическую величину, равную количеству теплоты, необходимому для обращения в пар 1 кг данной жидкости при неизменных температуре и давлении, называют **удельной теплотой парообразования этой жидкости (при данных температуре и давлении).**

Удельную теплоту парообразования обозначают буквой r . Единица этой величины в СИ – джоуль на килограмм (Дж/кг).

Удельная теплота парообразования для некоторых жидкостей при температуре их кипения и нормальном атмосферном давлении приведена в таблице 4.

Таблица 4

Вещество	r , МДж/кг	Вещество	r , МДж/кг
Вода	2,3	Эфир	0,4
Аммиак	1,4	Ртуть	0,3
Спирт	0,9	Жидкий воздух	0,2



В таблице указано, например, что удельная теплота парообразования воды равна 2,3 МДж/кг. Значит, для обращения 1 кг воды в пар при нормальном атмосферном давлении и температуре кипения воды необходимо затратить количество теплоты, равное 2,3 МДж.

! Для расчёта количества теплоты Q , необходимого для обращения в пар жидкости массой m при данной температуре, надо удельную теплоту парообразования r этой жидкости умножить на её массу m :

$$Q = r \cdot m.$$

При конденсации пара происходит обратный процесс, сопровождающийся выделением энергии. При неизменной температуре количество теплоты Q , выделившееся при конденсации пара массой m , *в точности равно количеству теплоты, затраченному на его получение при испарении*. Поэтому оно рассчитывается по той же формуле: $Q = r \cdot m$, где r – *удельная теплота конденсации* образующейся жидкости (равная удельной теплоте её парообразования).

Кроме испарения – перехода жидкости в пар с её поверхности, возможен и другой процесс паробразования – кипение.

В чём же состоит процесс кипения?

Понаблюдаем за ним на опыте. Для этого будем нагревать воду в прозрачном сосуде. Мы увидим (рис. 38), что на его дне и стенках в ходе нагревания появляются маленькие пузырьки. Это – пузырьки воздуха, растворённого в воде. Кроме воздуха, в пузырьках находится насыщенный пар, образующийся в результате испарения воды *внутрь* этих пузырьков. По мере нагревания давление насыщенного пара внутри пузырьков увеличивается и они начинают расти. С увеличением объёма пузырька увеличивается действие на него выталкивающей силы. В некоторый момент эта сила становится настолько большой, что она отрывает пузырёк от дна. При всплы-

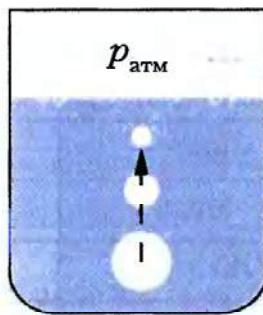


Рис. 38 Поднимающиеся пузырьки попадают в менее нагретые верхние слои жидкости, остывают и «склонываются»; в результате вода шумит

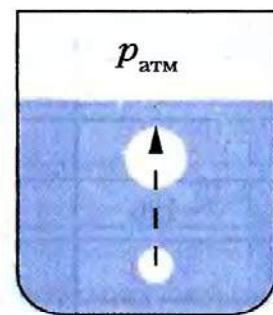


Рис. 39 В прогретой по всему объёму жидкости поднимающиеся пузырьки увеличиваются в размерах, так как внутрь них продолжает испаряться жидкость; вода кипит

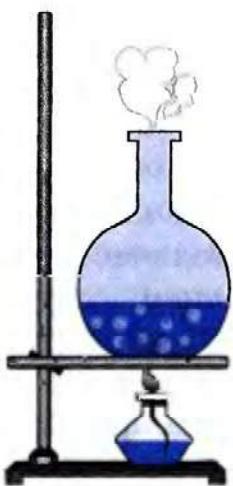


Рис. 40

При кипении воды пузырьки пара образуются по всему объёму жидкости

тии он попадает в верхние менее нагретые слои жидкости. Содержащийся в нём насыщенный пар остывает и конденсируется. В результате пузырёк «схлопывается». Мы слышим, как вода при этом шумит.

После того как вода достаточно прогреется по всему объёму сосуда, всплывающие пузырьки перестают «схлопываться». Напротив, их размеры по мере подъёма увеличиваются, так как испарение внутрь пузырьков продолжается (рис. 39). Достигая поверхности, они лопаются и выбрасывают пар в атмосферу. Вода начинает булькать — она кипит (рис. 40).

Кипение — это переход жидкости в пар, происходящий с образованием в объёме жидкости пузырьков пара.

Температуру, при которой жидкость кипит, называют температурой кипения этой жидкости.

Чтобы вскипятить жидкость, надо сначала нагреть её до температуры кипения. Эксперименты показывают, что температуры кипения различных жидкостей различны. Значения температур кипения некоторых веществ при нормальном атмосферном давлении приведены в таблице 5.

Таблица 5

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$
Гелий	-269	Эфир	35	Ртуть	357
Водород	-253	Спирт	78	Свинец	1740
Азот	-196	Вода	100	Медь	2540
Кислород	-183	Молоко	100	Железо	2750
Аммиак	-33	Скипидар	161	Вольфрам	5680

Эксперименты показывают, что в процессе кипения *температура любой жидкости остаётся постоянной от начала кипения до его конца* (т. е. пока вся жидкость не испарится) при неизменном внешнем давлении.

Чем же определяется температура кипения жидкости? Почему именно при определённой температуре начинается интенсивный рост образую-

щихся в жидкости пузырьков? Ведь испарение жидкости происходит при любой температуре.

Ясно, что процессу увеличения размеров пузырьков препятствует внешнее давление, которое складывается из атмосферного давления над поверхностью жидкости и гидростатического давления. (Отметим, что если сосуд неглубокий, то гидростатическое давление считают малым по сравнению с атмосферным и им пренебрегают.) Интенсивный рост пузырьков начинается только тогда, когда *давление находящегося в них насыщенного пара в результате увеличения температуры сравнивается с внешним давлением*.



Поэтому температура кипения жидкости равна температуре, при которой давление насыщенного пара этой жидкости равно внешнему давлению.

Таким образом, при увеличении внешнего давления жидкость закипит при более высокой температуре. Напротив, при уменьшении внешнего атмосферного давления кипение данной жидкости начнётся при более низкой температуре.

В таблице 6 приведены атмосферные давления и температуры кипения воды на различной высоте над уровнем моря.

Таблица 6

Высота над уровнем моря, км	Давление, атм (10^5 Па)	Температура кипения, °C
0 (уровень моря)	1,01	100
1	0,89	96,4
2	0,78	92,8
4	0,61	86,4
8	0,35	72,8

Вы уже знаете, что температуры кипения различных жидкостей при нормальном атмосферном давлении различаются (см. табл. 5). Это связано с тем, что давление насыщенных паров у разных веществ становится равным давлению окружающей атмосферы при разных температурах.

Физическую величину, равную количеству теплоты, необходимому для обращения в пар 1 кг данной жидкости при неизменных температуре и давлении, называют **удельной теплотой парообразования** этой жидкости.

Для расчёта количества теплоты Q , необходимой для обращения в пар жидкости массой m при данной температуре, надо **удельную теплоту парообразования r этой жидкости умножить на её массу: $Q = r \cdot m$.**

Кипение — это переход жидкости в пар, происходящий с образованием в объёме жидкости пузырьков пара.

Температуру, при которой жидкость кипит, называют температурой кипения этой жидкости.

В процессе кипения температура любой жидкости остаётся **постоянной** от начала кипения до его конца.

Температуры кипения разных жидкостей различны.

Вопросы

- 1 Что называют **удельной теплотой парообразования** жидкости?
- 2 Как соотносятся между собой количество теплоты, выделяющееся при конденсации 1 кг пара, и количество теплоты, затраченное на получение 1 кг пара того же вещества при испарении (при одинаковом внешнем давлении)? Объясните свой ответ.
- 3 Опишите процесс кипения.
Что происходит с давлением насыщенного пара внутри пузырьков по мере нагревания жидкости?
Что происходит с пузырьками по мере нагревания жидкости?
Какая сила отрывает пузырёк, образующийся в нагреваемой жидкости, от дна сосуда?
Почему перед закипанием вода шумит?
Как изменяются размеры пузырьков, образующихся в прогретой жидкости, по мере их подъёма к поверхности?
- 4 Изменяется ли температура жидкости при её кипении? Поясните ответ.
- 5 Чем определяется температура кипения жидкости?
- *6 Почему температура кипения зависит от внешнего давления?
- *7 Почему отличаются температуры кипения у различных жидкостей?

Упражнения

1. Какое количество теплоты необходимо для обращения в пар 10 г спирта при его температуре кипения и нормальном атмосферном давлении?
2. Какое количество теплоты Q выделится при конденсации водяного пара массой $m = 1,5$ кг, при температуре 100°C и нормальном атмосферном давлении?
3. Найдите количество теплоты, требующееся для нагревания до температуры кипения и превращения в пар спирта массой $m = 10$ кг, взятого при температуре $t = 18^\circ\text{C}$ и нормальном атмосферном давлении.
4. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы 1 л воды, взятой при комнатной температуре 20°C , нагреть до кипения и превратить в пар при нормальном атмосферном давлении?
5. Проведите наблюдение процессов нагревания и кипения воды в стеклянной кастрюле, зафиксировав появление пузырьков, их увеличение и последующий отрыв от стенок, шум закипающей воды, кипение. Проведите фото- или видеосъёмку различных этапов процесса. Сравните ваши наблюдения с описанием этих процессов в учебнике.

§ 21 Плавление и кристаллизация. Удельная теплота плавления

Плавление твёрдых веществ очень распространённое явление. Наверняка вы видели, как тают куски льда весной или при попадании в тёплое помещение. При этом твёрдое тело (лёд) переходит в другое агрегатное состояние и становится жидкостью. Многим из вас приходилось также наблюдать плавление свинца или олова. Повседневный опыт показывает, что при передаче твёрдому телу достаточной энергии (например, количества теплоты при нагревании) его в конце концов можно перевести в жидкое состояние.

Переход вещества из твёрдого состояния в жидкое называют плавлением.

Столь же часто встречается и обратный процесс – переход вещества из жидкого состояния в твёрдое. В результате такого процесса вода замерзает и превращается в лёд – становится твёрдым телом, расплавленные

свинец или олово, если прекратить их нагревание и начать охлаждать, застывают и становятся твёрдыми. Таким образом, если вещество в жидким состоянии отдаст достаточное количество теплоты, то оно в конце концов перейдёт в твёрдое состояние.

Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое называют кристаллизацией.

Рассмотрим подробно процессы плавления твёрдого тела и последующей кристаллизации полученного из него расплава на примере куска олова, помещённого в стальной стакан. Будем следить за изменением температуры олова при нагревании на горелке. Это изменение представлено на графике зависимости температуры олова от времени (рис. 41).

Участок AB этого графика соответствует промежутку времени, в течение которого кусок олова оставался твёрдым, но его температура увеличивалась. Изменение температуры олова на этом участке описывается известной вам зависимостью, в которую входят количество теплоты Q , переданное олову, и его теплоёмкость $C = c \cdot m$, где m – масса нагреваемого куска олова, а c – удельная теплоёмкость этого вещества. Изменение температуры олова Δt определяют по формуле: $\Delta t = \frac{Q}{c \cdot m}$. Таким образом, чем большее количество теплоты передаётся олову, тем выше его температура.

Вы уже знаете, что при этом полученное веществом количество теплоты идёт в основном на увеличение кинетической энергии хаотического движения частиц, колеблющихся в узлах кристаллической решётки.

Наличие участка AB показывает, что для плавления тела его надо сначала нагреть до определённой температуры.

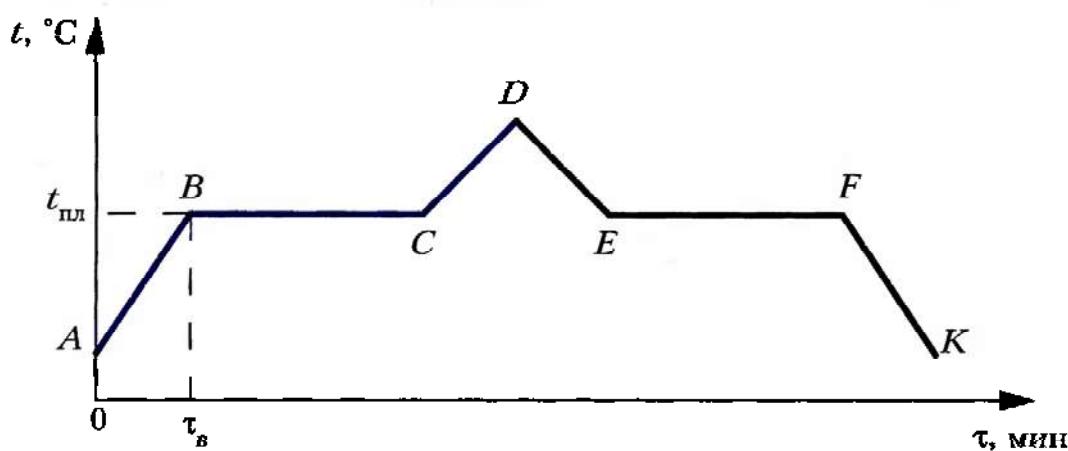


Рис. 41

График зависимости температуры кристаллического тела от времени τ в процессе его плавления и последующей кристаллизации

В момент, соответствующий точке *B*, *рост температуры вещества прекращается*. Хотя олово продолжает постоянно получать от горелки некоторое количество теплоты, его температура остаётся неизменной. При этом мы наблюдаем, что олово начинает плавиться.

Температуру, при которой вещество плавится, называют температурой плавления вещества.

В таблице 7 приведены температуры плавления некоторых веществ при нормальном атмосферном давлении.

Таблица 7

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$
Водород	-259	Цинк	420
Кислород	-219	Алюминий	660
Азот	-210	Серебро	962
Спирт	-114	Золото	1064
Ртуть	-39	Медь	1085
Лед	0	Чугун	1200
Калий	63	Сталь	1500
Натрий	98	Железо	1539
Олово	232	Платина	1772
Свинец	327	Осмий	3045
Янтарь	360	Вольфрам	3387

Из графика на рис. 41 видно, что температура взятого образца остаётся постоянной на всём участке *BC* – до тех пор, пока всё олово не станет жидким. Постоянство температуры означает, что кинетическая энергия хаотического движения частиц в процессе плавления не изменяется. На что же идёт полученное веществом за это время количество теплоты? В основном оно расходуется на разрушение связей между частицами в узлах кристаллической решётки. Следовательно, в результате плавления увеличивается потенциальная энергия взаимодействия частиц вещества друг с другом. Поэтому внутренняя энергия вещества в жидким состоянии больше внутренней энергии этого вещества *при той же температуре* в твёрдом состоянии.

нии. Отметим, что часть полученного веществом количества теплоты идёт на совершение работы при расширении против сил внешнего давления. Поэтому количество теплоты, необходимое для плавления вещества, зависит от внешнего давления.

! В процессе плавления температура тела остаётся неизменной, а его внутренняя энергия увеличивается.

Эксперимент показывает, что длительность процесса на участке BC , а следовательно, и количество теплоты Q , полученное при этом веществом, пропорциональны массе m вещества. Это легко объяснить, если вспомнить, что, например, в 2 кг вещества содержится в два раза больше молекул, чем в 1 кг того же вещества. Следовательно, при плавлении 2 кг потребуется разрушить в два раза большее число межмолекулярных связей.

Понятно также, что при плавлении различных веществ одной и той же массы потребуются разные количества теплоты, так как энергии связей между молекулами в кристаллических решётках разных веществ различны.

Количество теплоты, которое необходимо сообщить кристаллическому телу массой 1 кг, чтобы при температуре плавления полностью перевести его в жидкое состояние, называют удельной теплотой плавления вещества этого тела.

Удельную теплоту плавления принято обозначать греческой буквой λ . Её единица в СИ – джоуль на килограмм ($\text{Дж}/\text{кг}$).

Удельная теплота плавления некоторых веществ при нормальном атмосферном давлении приведена в таблице 8.

Таблица 8

Вещество	$\lambda, 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$	Вещество	$\lambda, 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$
Алюминий	3,9	Сталь	0,84
Лёд	3,4	Золото	0,67
Железо	2,7	Водород	0,59
Медь	2,1	Олово	0,59
Парафин	1,5	Свинец	0,25
Спирт	1,1	Кислород	0,14
Серебро	0,87	Ртуть	0,12

!

Чтобы вычислить количество теплоты Q , необходимое для плавления кристаллического тела массой m при его температуре плавления, надо удельную теплоту плавления λ вещества этого тела умножить на его массу:

$$Q = \lambda \cdot m.$$

Вернёмся к графику, приведённому на рис. 41. После того как всё олово перешло в жидкое состояние, его температура вновь начинает расти (участок CD). Скорость этого роста определяется получаемым количеством теплоты за единицу времени и теплоёмкостью жидкого олова.

Как только мы выключим горелку (этот момент соответствует на графике точке D), процесс передачи олову теплоты прекратится.

Начнётся *обратный процесс* – отдача жидким оловом энергии окружающей среде. В результате вначале мы будем наблюдать понижение температуры жидкого олова (участок DE) до температуры плавления. После этого начнётся процесс *кристаллизации* (участок EF), в ходе которого температура будет оставаться неизменной до тех пор, пока всё вещество не перейдёт в твёрдое состояние.

Эксперименты показывают, что при неизменном внешнем давлении температура кристаллизации равна температуре плавления.

!

При кристаллизации данного вещества при неизменном внешнем давлении выделяется точно такое же количество теплоты, какое поглощается при его плавлении.

Это легко понять, если учсть, что при кристаллизации образуется такое же кристаллическое вещество, которое было до плавления. Поэтому его внутренняя энергия будет такой же, какой была до плавления. Следовательно, изменения внутренней энергии вещества при плавлении и кристаллизации равны по модулю. Значит, количества теплоты – полученное при плавлении и выделившееся при кристаллизации – должны быть равными. **К**

Участок FK графика соответствует остыванию твёрдого куска олова до температуры окружающей среды.

К

Таким образом, для вычисления количества теплоты, выделяющегося при кристаллизации, необходимо пользоваться приведённой выше формулой:
$$Q = \lambda \cdot m.$$

Итоги

Переход вещества из твёрдого состояния в жидкое называют плавлением.

Температуру, при которой вещество плавится, называют температурой плавления вещества.

Количество теплоты, которое необходимо сообщить кристаллическому телу массой 1 кг, чтобы при температуре плавления полностью перевести его в жидкое состояние, называют удельной теплотой плавления вещества этого тела.

Переход вещества из жидкого состояния в твёрдое называют кристаллизацией.

Температуры плавления и кристаллизации для данного вещества при неизменном внешнем давлении равны.

Количество теплоты, выделяющееся при кристаллизации вещества, при неизменном внешнем давлении равно количеству теплоты, полученному этим веществом при плавлении.

Вопросы

- 1. Что называют плавлением?**
- 2. Что называют кристаллизацией?**
- 3. На что идёт полученное веществом в процессе плавления количество теплоты с точки зрения молекулярной теории?**
- 4. Что называют удельной теплотой плавления?**
- 5. Как изменяется кинетическая энергия хаотического движения молекул в процессе плавления? Изменяется ли при этом потенциальная энергия их взаимодействия друг с другом?**
- 6. Как изменяется внутренняя энергия вещества в процессе плавления?**
- *7. Почему удельные теплоты плавления разных веществ различаются?**
- 8. Как соотносятся температуры кристаллизации и плавления вещества при неизменном внешнем давлении?**
- *9. Как соотносятся количество теплоты, выделяющейся при кристаллизации вещества, и количество теплоты, поглощаемое при его плавлении (при неизменном внешнем давлении)? Как будут соотноситься эти количества теплоты, если внешнее давление при плавлении будет больше внешнего давления при кристаллизации?**

Упражнения

- А** Бросьте кусочек парафиновой свечки в стоящую на плите кастрюлю с кипящей водой. Наблюдайте, что происходит с этим кусочком. Через некоторое время переставьте кастрюлю на деревянную подставку. Продолжайте наблюдение. Опишите все наблюдавшиеся вами изменения состояния парафина.
- Б** На рис. 42 приведён график зависимости температуры вещества массой 2 кг от времени. Используя график и соответствующие таблицы из учебника, выполните следующие задания.

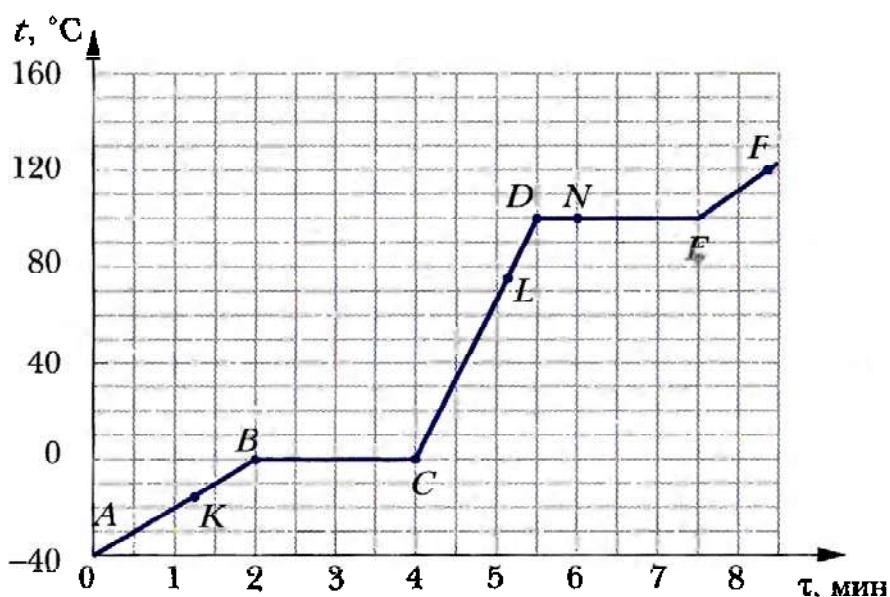


Рис. 42

- 1 Определите, какое это вещество.
- 2 Каким процессам соответствуют участки AB , BC , CD , DE , EF ?
- 3 Как изменялась внутренняя кинетическая энергия этого вещества на участках AB , BC , CD , DE , EF ?
- 4 В какой точке (L или N) молекулы данного вещества обладали большей кинетической энергией хаотического движения?
- 5 В какой из точек (D или E) молекулы данного вещества обладали большей внутренней потенциальной энергией?
- 6 Какое количество теплоты было передано веществу на участках AB , BC , CD , DE ?
- *7 Какое количество теплоты получает вещество на участке BE ?
- 8 Оцените мощность нагревателя, используемого на разных этапах представленного процесса.

ИЗМЕНЕНИЕ АГРЕГАТНЫХ СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА

Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое связан с изменением потенциальной энергии взаимодействия его молекул друг с другом и принципиальным изменением характера их движения. Поэтому при таких переходах вещество либо поглощает (при парообразовании и плавлении), либо выделяет (при конденсации и кристаллизации) определённое количество теплоты.

Эти количества теплоты при прямом и обратном переходах из одного агрегатного состояния в другое при неизменном внешнем давлении *равны*.

Изменение агрегатного состояния при постоянном внешнем давлении происходит при постоянной температуре. При кипении её называют температурой кипения, а при плавлении – температурой плавления.

Для расчёта количества теплоты Q , необходимого для обращения в пар жидкости массой m , взятой при температуре кипения, надо удельную теплоту парообразования r этой жидкости умножить на её массу:

$$Q = r \cdot m.$$

Чтобы вычислить количество теплоты Q , необходимое для плавления однородного кристаллического тела массой m при его температуре плавления, надо удельную теплоту плавления λ вещества этого тела умножить на его массу:

$$Q = \lambda \cdot m.$$



Для дополнительного изучения

Глава 4

Газовые законы

В соответствии с нулевым законом термодинамики любая теплоизолированная термодинамическая система, над которой не совершают работу, с течением времени приходит в состояние теплового (термодинамического) равновесия. Такое состояние термодинамической системы можно охарактеризовать набором термодинамических параметров: температурой, давлением, объёмом, массой вещества. Часто их называют *макропараметрами*. В отличие от *микропараметров* (например, скорости хаотического движения молекул, числа молекул в единице объёма и т. п.) значения макропараметров можно измерить с помощью физических приборов: температуру — термометром, давление — манометром и т. д.

Оказывается, макропараметры термодинамической системы не могут принимать произвольные значения. Они связаны между собой определёнными соотношениями. Эти соотношения были получены при обобщении данных ряда экспериментов. В них исследовались переходы термодинамической системы из одного состояния в другое.

Переход термодинамической системы из одного состояния в другое называют процессом.

Мы с вами ограничимся изучением только таких процессов, в которых *состоение термодинамической системы изменяется настолько медленно, что в любой момент времени можно считать, что система находится в состоянии теплового (термодинамического) равновесия*.

Такие процессы называют *равновесными*. При равновесных процессах в любой момент времени состояние термодинамической системы можно описать набором макроскопических параметров.

Простейшей термодинамической системой является газ. Изучим, как связаны между собой макроскопические параметры такой термодинамической системы.

§ 22

Закон Бойля – Мариотта. Изотермический процесс

В XVII в. ирландский физик Роберт Бойль (1626–1691) и французский физик Эдм Мариотт (1620–1684) независимо друг от друга экспериментально исследовали свойства газа в закрытом сосуде. Для неизменной массы газа им удалось установить зависимость давления p от его объёма V при постоянной температуре T .

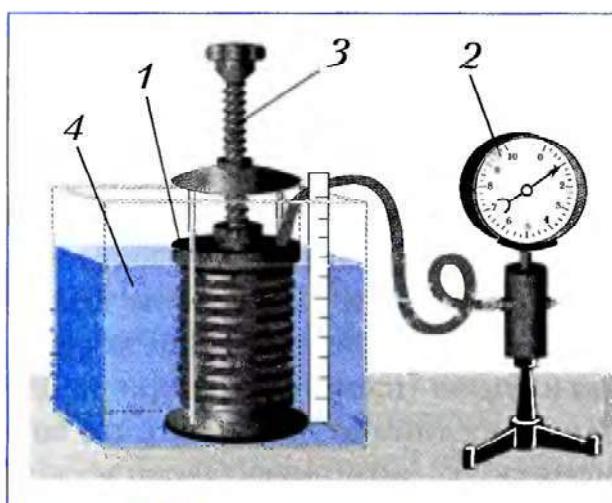


Рис. 43

Установка для исследования изменений температуры, объёма и давления газа в сосуде при равновесных процессах

полового равновесия между газом в сосуде и окружающей водой. На протяжении всего эксперимента температура воды и газа поддерживается постоянной.

Пусть начальный объём газа в сосуде равен V , а его давление равно p . Будем медленно, чтобы процесс был равновесным, при помощи винта 3 уменьшать объём исследуемого газа. По показаниям манометра 2 легко убедиться, что давление газа при этом будет увеличиваться. При уменьшении объёма, например в два раза – до значения $\frac{V}{2}$, давление газа увеличится также в два раза – до значения $2p$. Продолжая эксперимент, мы убедимся в том, что при уменьшении объёма газа в некоторое число раз его давление увеличивается в такое же число раз.

Таким образом, в данном эксперименте произведение давления газа на его объём остаётся постоянным:

$$p \cdot V = 2p \cdot \frac{V}{2} = 3p \cdot \frac{V}{3} = \text{const.}$$

В настоящее время аналогичный эксперимент вы можете провести в школьной лаборатории на установке, изображённой на рис. 43.

Она представляет собой наполненный воздухом герметический гофрированный сосуд 1. Этот сосуд соединён с манометром 2, который измеряет давление газа внутри сосуда. Объём исследуемого газа можно изменять вместе с объёмом сосуда при помощи винта 3. Весь сосуд с газом помещён в ванну с водой 4, температура которой при данном процессе поддерживается постоянной и контролируется термометром.

После сборки всей установки необходимо дождаться установления теплоизолированного равновесия между газом в сосуде и окружающей водой. На протяжении всего эксперимента температура воды и газа поддерживается постоянной.

Следовательно, $p \cdot V = \text{const}$ при $T = \text{const}$.

Это соотношение выполняется для всех газов, в том числе для их смесей (например, воздуха), при температурах и давлениях, близких к нормальным (760 мм рт. ст., 20 °C). **К**

Дальнейшие исследования показали, что при сильном сжатии газа и значительном изменении его температуры это соотношение нарушается. Было установлено, что оно с высокой степенью точности выполняется только для достаточно разреженных газов при температурах, близких к нормальной. При таких условиях расстояния между молекулами газа много больше размеров самих молекул, в результате чего силы взаимного притяжения между молекулами пренебрежимо малы. Такой газ можно считать **идеальным**.

Идеальным называют газ, между молекулами которого отсутствуют силы взаимного притяжения и среднее расстояние между молекулами много больше их размеров.

В результате мы получаем закон, который называют законом Бойля — Мариотта.

Для идеального газа данной массы произведение давления газа на его объём постоянно, если температура газа не меняется:

$p \cdot V = \text{const}$ при $T = \text{const}$.



Закон Бойля — Мариотта для газа данной массы может быть записан в виде $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$, где p_1 и V_1 — давление и объём газа в состоянии 1, а p_2 и V_2 — давление и объём в состоянии 2 при условии, что температуры газа в состояниях 1 и 2 равны ($T_1 = T_2$).

График зависимости давления идеального газа от его объёма при постоянной температуре приведён на рис. 44. Изображённую на графике кривую называют *изотермой* (от греч. *isos* — равный и *termos* — тёплый). Эта кривая соответствует обратно пропорциональной зависимости между давлением и объёмом. В математике такую кривую называют гиперболой.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называют изотермическим.

Приближённо изотермическим можно считать процесс медленного сжатия (или расширения) идеального газа под поршнем при условии, что в лю-



В школьной лаборатории вы «проверяете» закон Бойля — Мариотта, изменяя давление воздуха в гофрированном сосуде в пределах от 1 до 1,5 атм. Исследуя зависимость изменения давления газа от его объёма, Бойль в 1661 г. изменял давление в пределах от 1/30 до 4 атм.

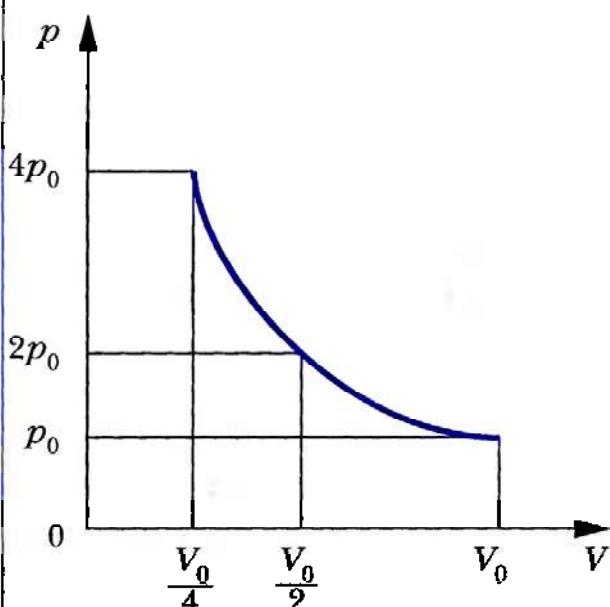


Рис. 44

График зависимости давления газа данной массы от его объема при изотермическом процессе

например в два раза? Так как температура газа не изменяется, то темп хаотического движения молекул также не изменяется. Поэтому не изменяется и средняя скорость, с которой молекулы налетают на стенки. При уменьшении объема в два раза число молекул, приходящееся на единицу объема газа, увеличивается также в два раза (так как общее число молекул остается неизменным). Поэтому на ту же стенку за то же время будет налетать в два раза большее число молекул. В результате действие, оказываемое ими на стенку, также увеличится в два раза. Следовательно, в два раза увеличится и давление газа.

Итоги

Переход термодинамической системы из одного состояния в другое называют процессом.

Процесс, в котором состояние термодинамической системы изменяется настолько медленно, что в любой момент времени можно считать систему находящейся в состоянии теплового (термодинамического) равновесия, называют равновесным процессом.

Идеальным называют газ, между молекулами которого отсутствуют силы взаимного притяжения и среднее расстояние между молекулами много больше их размеров.

бой момент времени он находится в состоянии теплового равновесия с окружающими его телами, температура которых постоянна.

Полученную зависимость давления газа от его объема при постоянной температуре можно объяснить, используя молекулярную теорию. Для этого надо учесть, что давление газа на стенки сосуда – это результат огромного числа ударов хаотически движущихся молекул газа об эти стенки. Чем с большей скоростью молекулы газа налетают на стенки и чем большее число ударов происходит за единицу времени, тем большее давление оказывает газ на стенки сосуда.

Что же происходит при изотермическом уменьшении объема газа,

Закон Бойля – Мариотта.

Для идеального газа данной массы произведение давления газа на его объём постоянно, если температура газа не меняется:

$$p \cdot V = \text{const} \text{ при } T = \text{const}.$$

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называют изотермическим.

Вопросы

- 1 Сформулируйте нулевой закон термодинамики.
- 2 Какие макропараметры термодинамической системы вы знаете?
- 3 Что называют процессом в термодинамике?
- 4 Какой процесс называют равновесным?
- 5 Приведите пример простейшей термодинамической системы.
- 6 Какой процесс называют изотермическим?
- 7 Что такое идеальный газ?
- 8 Объясните с точки зрения молекулярной теории, почему при изотермическом уменьшении объёма данного газа в несколько раз его давление увеличивается во столько же раз.

Упражнения

- 1 Как изменится давление данного идеального газа, если объём сосуда, в котором он находится, изотермически увеличить в два раза?
- 2 Газ сжат изотермически от объёма 8 л до объёма 6 л. Давление газа при этом возросло на $\Delta p = 4$ кПа. Определите первоначальное давление p_1 .
- 3 Данная масса воздуха при нормальных условиях занимает объём $V_1 = 1$ м³. Какой объём будет занимать этот воздух после изотермического закачивания его в шину автомобиля? Давление воздуха вшине $p_2 = 4,9$ атм.
- 4 С учётом того, что $p = m/V$, установите характер зависимости давления газа данной массы при изотермическом процессе от его плотности. Изобразите эту зависимость графически.

§ 23 Изохорный процесс. Закон Шарля

В 1787 г. французский физик Жак Шарль (1746–1823) экспериментально исследовал зависимость давления газа от его температуры в сосуде постоянного объёма.

Мы можем провести аналогичный эксперимент на установке, описанной в предыдущем параграфе (см. рис. 43).

Для этого зафиксируем винт 3 в определённом положении, чтобы объём исследуемого газа на протяжении всего эксперимента оставался постоянным. Дождёмся установления теплового равновесия между сосудом с газом и окружающей его водой. После этого будем медленно (чтобы процесс получился равновесным) изменять температуру воды, наблюдая за показаниями термометра и манометра. Изменение температуры воды приведёт к соответствующему изменению температуры газа в сосуде и соответственно давления газа.

Эксперимент показывает, что при увеличении температуры газа его давление также увеличивается. Напротив, уменьшение температуры газа приводит к уменьшению его давления. Результаты данного эксперимента приведены на рис. 45.

Полученный график зависимости давления газа от его температуры при постоянном объёме газа представляет собой прямую линию, которую называют *изохорой* (от греч. *isos* – равный и *horema* – вместимость). Эксперименты показывают, что изохора имеет такой же вид для любого газа, который можно считать идеальным.

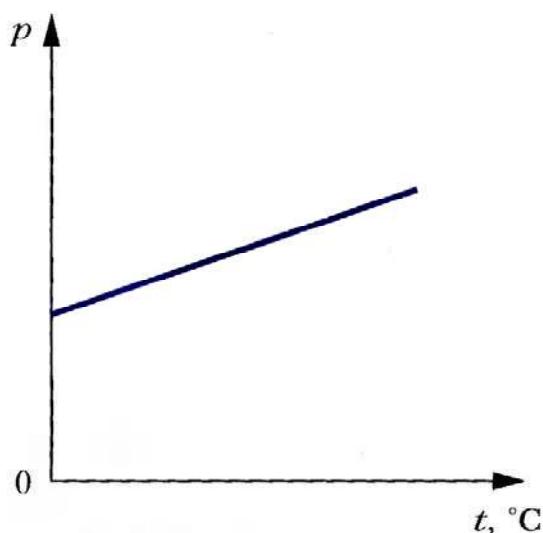


Рис. 45

График зависимости давления газа от его температуры при изохорном процессе

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объёме называют изохорным.

! Таким образом, при изохорном процессе изменение давления идеального газа данной массы прямо пропорционально изменению его температуры.

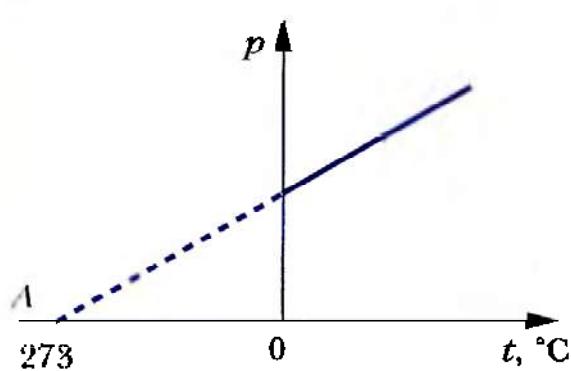


Рис. 46 Изохора достигнет оси температур в точке, соответствующей абсолютному нулю по шкале Кельвина

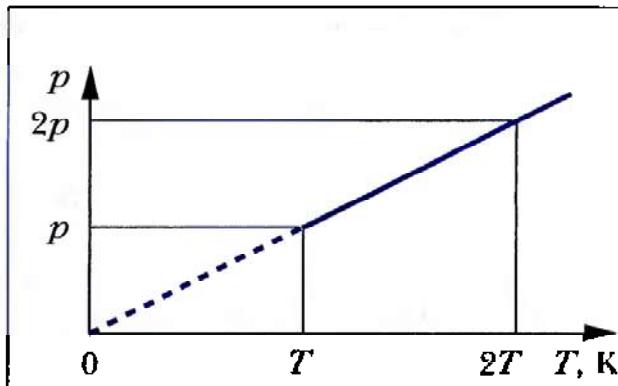


Рис. 47 График зависимости давления идеального газа от его абсолютной температуры проходит через начало координат

Продолжим прямую, описывающую зависимость давления идеального газа от его температуры, в область низких температур. Понятно, что в конце концов она пересечёт ось температур в точке *A* (рис. 46).

Многочисленные эксперименты показали, что для любого идеального газа точке *A* соответствует температура $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (примерно $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$). Как вы уже знаете, это температура абсолютного нуля по шкале Кельвина.

Перерисуем график зависимости давления от температуры, отложив по оси абсцисс температуру по шкале Кельвина. Полученный график примет вид прямой, проходящей через начало координат (рис. 47). Что это означает?

Во-первых, при стремлении абсолютной температуры идеального газа к нулевому значению при постоянном объёме его давление также стремится к нулю.

Во-вторых, при неизменном объёме газа уменьшение (увеличение) его абсолютной температуры в некоторое число раз приводит к соответствующему уменьшению (увеличению) давления этого газа в такое же число раз.

Для идеального газа данной массы отношение давления газа к его абсолютной температуре постоянно, если объём газа не меняется:

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

Этот экспериментально установленный закон назван именем Ж. Шарля.

! Закон Шарля может быть записан в виде $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$, где p_1 и T_1 — давление и температура газа в состоянии 1, а p_2 и T_2 — давление и температура в состоянии 2 при условии, что объёмы данной массы газа в состояниях 1 и 2 равны ($V_1 = V_2$).

Обсудим закон Шарля с точки зрения молекулярной теории. Как вы помните, уменьшение абсолютной температуры термодинамической системы означает уменьшение темпа хаотического движения её молекул. Чем этот темп ниже, тем меньшее действие на стенки сосуда оказывают налетающие на них молекулы. Следовательно, чем ниже температура газа, тем меньше его давление. Поэтому при стремлении абсолютной температуры идеального газа к нулю его давление также будет стремиться к нулю.

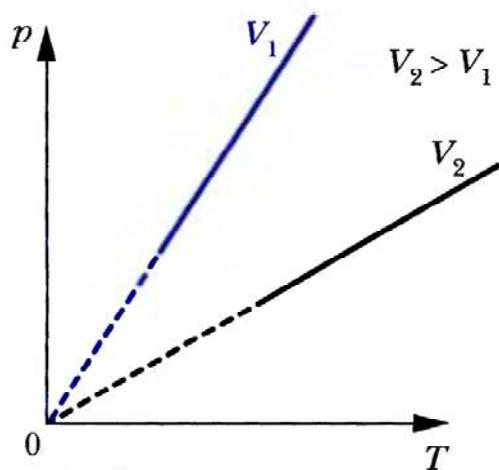


Рис. 43 Зависимости давления газа от абсолютной температуры для одинаковых масс одного и того же газа при разных объёмах сосуда

На самом деле остудить газ до температур близких к абсолютному нулю чрезвычайно сложно. Кроме того, при столь низких температурах реальные газы конденсируются (сжижаются) и закон Шарля для них не выполняется. Поэтому часть прямой вблизи от абсолютного нуля принято изображать пунктирной линией (см. рис. 46 и 47). Это подчёркивает, что закон Шарля в области очень низких температур не выполняется.

! Закон Шарля, как и закон Бойля — Мариотта, выполняется только для идеального газа.

В заключение отметим, что для одних и тех же масс одинакового идеального газа, содержащихся в сосудах разного объёма V_1 и V_2 , изохоры представляют собой разные прямые (рис. 48). Отметим, что продолжения обеих прямых в области низких температур проходят через начало координат. При этом чем больше объём сосуда, тем медленнее увеличивается давление газа в сосуде с увеличением абсолютной температуры.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объёме называют изохорным.

Закон Шарля.

Для идеального газа данной массы отношение давления газа к его абсолютной температуре постоянно, если объём газа не меняется:

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

График зависимости давления идеального газа от его абсолютной температуры при постоянном объёме представляет собой прямую линию, продолжение которой проходит через начало координат. Эту прямую называют изохорой.

Вопросы

- 1 Какой процесс изменения состояния термодинамической системы называют изохорным?
- 2 Как изменяется давление идеального газа при увеличении его температуры в некоторое число раз при изохорном процессе?
- 3 Какой температуре по шкале Цельсия соответствует точка, в которой продолжение изохоры достигает оси температур?
- 4 Объясните с точки зрения молекулярной теории, почему увеличение температуры газа при изохорном процессе приводит к увеличению его давления?
- 5 Почему при стремлении абсолютной температуры идеального газа к нулю его давление также стремится к нулю?
- *6 Как отличаются изохоры для одинаковых масс одного и того же газа, заключенных в сосуды разного объёма? Объясните с точки зрения молекулярной теории, почему газу большего объёма соответствует изохора с меньшим углом наклона (см. рис. 48)?

Упражнения

- 1 Как изменится давление идеального газа в закрытом сосуде постоянного объёма, если его абсолютную температуру уменьшить в два раза?
- 2 Как изменится абсолютная температура идеального газа в закрытом сосуде постоянного объёма, если его давление увеличить в три раза?

- 3 В закрытом сосуде постоянного объёма при температуре 27°C давление газа составляло 150 кПа. Каким будет давление этого газа при температуре -23°C ?
- 4 При какой температуре находился газ в закрытом сосуде, если при изохорическом нагревании на 400 K его давление возросло в три раза?
- *5 Объясните с точки зрения молекулярной теории, как будут отличаться друг от друга графики зависимостей давления от абсолютной температуры для одинаковых идеальных газов одной и той же массы, нагреваемых изохорически в двух сосудах разных объёмов ($V_1 = 2V_2$).
-  6 Объясните с точки зрения молекулярной теории, как будут отличаться друг от друга графики зависимостей давления от абсолютной температуры для одинаковых идеальных газов различной массы ($m_1 = 2m_2$), нагреваемых изохорически в двух сосудах с одинаковыми объёмами.

§ 24

Изобарный процесс. Закон Гей-Люссака

В начале XIX в. французский физик Жозеф Луи Гей-Люссак (1778–1850) опубликовал данные экспериментальных исследований, показывающие, как изменяется объём газа при изменении его температуры в сосуде, где поддерживается постоянное давление.

Проведём аналогичные исследования на уже знакомой установке, описанной в § 22 (см. рис. 43).

Для этого нам придётся поддерживать давление исследуемого газа *постоянным* и контролировать его по манометру на протяжении всего эксперимента. Дождёмся установления теплового равновесия между сосудом с газом и окружающей его водой. После этого будем медленно (чтобы процесс получился равновесным) изменять температуру воды, наблюдая за показаниями термометра. Изменение темпе-

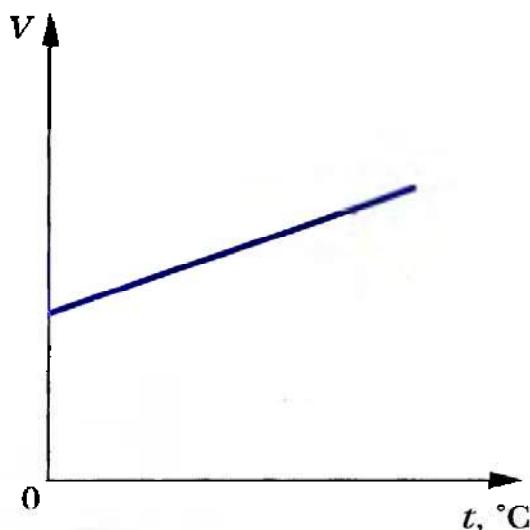


Рис. 49 График зависимости объёма газа от его температуры при изобарном процессе

ратуры воды приведёт к соответствующему изменению температуры газа в сосуде.

В ходе эксперимента мы убедимся, что при изменении температуры газа в сосуде для поддержания постоянного давления *необходимо изменять объём сосуда*, пользуясь для этого регулировочным винтом.

! Если температура газа в сосуде увеличивается, то для поддержания давления газа постоянным необходимо увеличивать объём сосуда. Напротив, при уменьшении температуры газа объём сосуда необходимо уменьшать.

Полученная экспериментально зависимость объёма V газа данной массы от его температуры t при постоянном давлении приведена на рис. 49. График этой зависимости представляет собой прямую линию, которую называют *изобарой* (от греч. *isos* – равный и *baros* – давление).

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют изобарным.

Если мы продолжим полученную прямую в область низких температур (рис. 50), то убедимся, что она достигнет оси температур в некоторой точке A . Как показывают исследования, она соответствует абсолютному нулю по шкале Кельвина (приблизительно -273°C).

Таким образом, мы приходим к выводу, что если при постоянном давлении идеального газа его абсолютная температура стремится к нулю, то объём газа также будет стремиться к нулю.

Теперь перерисуем график, заменив на осях абсцисс шкалу Цельсия на шкалу Кельвина (рис. 51). Из полученного графика видно:

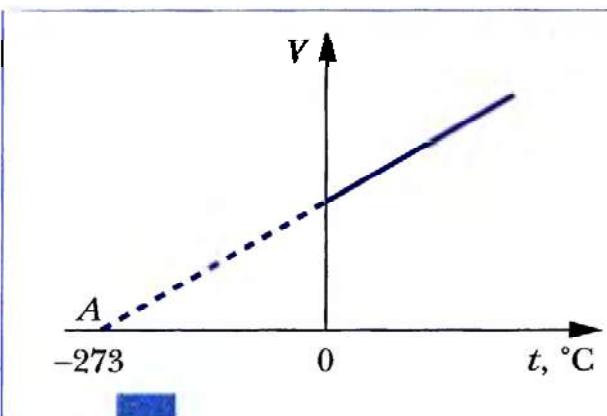


Рис. 50 Продолжение изобары достигает оси температур в точке, соответствующей абсолютному нулю по шкале Кельвина

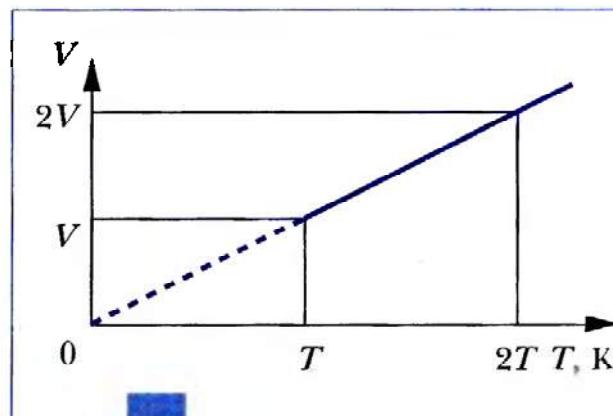


Рис. 51 График зависимости объема идеального газа от абсолютной температуры проходит через начало координат

! при неизменном давлении идеального газа данной массы уменьшение (увеличение) его абсолютной температуры T в некоторое число раз приводит к соответствующему уменьшению (увеличению) его объёма V в такое же число раз.

Приведённая на рис. 51 изобара графически описывает закон Гей-Люссака.

Для идеального газа данной массы отношение объёма газа к его абсолютной температуре постоянно, если давление газа не меняется:

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

! Закон Гей-Люссака может быть записан в виде $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$,

где V_1 и T_1 — объём и температура газа в состоянии 1, а V_2 и T_2 — объём и температура в состоянии 2 при условии, что давление газа в состояниях 1 и 2 не меняется ($p_1 = p_2$).

Как и другие газовые законы, закон Гей-Люссака можно объяснить с точки зрения молекулярной теории.

При уменьшении абсолютной температуры газа хаотическое движение его молекул замедляется. Это приводит к уменьшению действия, которое оказывают в среднем на стенки сосуда ударяющиеся о них молекулы. Чтобы давление газа оставалось неизменным, необходимо, чтобы оставалось неизменным общее действие всех молекул на стенки сосуда. Это возможно, только если одновременно с замедлением темпа хаотического движения молекул увеличивать число ударов молекул о стенку. Для этого нужно уменьшать объём сосуда, чтобы возросло число молекул в единице объёма. В результате будет увеличиваться число столкновений молекул со стенками сосуда за единицу времени.

При стремлении абсолютной температуры идеального газа к нулю средняя скорость хаотического движения его молекул также будет стремиться к нулю. Поэтому для поддержания постоянного давления такого газа придётся уменьшать его объём до весьма малых значений.

Отметим, что на самом деле сжать реальный газ до нулевого объёма, конечно же, невозможно. Это связано, например, с тем, что сами молекулы газа имеют объём. Кроме того, при сближении молекул на малые расстояния между ними проявляются огромные силы взаимного отталкивания. Поэтому так же, как и изохору, изобару в области низких температур изображают пунктирной линией. Этим подчёркивают, что закон Гей-Люссака в этой области не выполняется.

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют изобарным.

Закон Гей-Люссака.

Для идеального газа данной массы отношение объёма газа к его абсолютной температуре постоянно, если давление газа не меняется:

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

График зависимости объёма идеального газа от его абсолютной температуры при постоянном давлении – прямая линия, продолжение которой проходит через начало координат.

Вопросы

- 1 Какой процесс изменения состояния термодинамической системы называют изобарным?
- 2 Как изменяется объём идеального газа при увеличении его температуры при изобарном процессе?
- 3 Какой температуре по шкале Цельсия соответствует точка, в которой продолжение изобары достигает оси температур?
- 4 Можно ли реальный газ сжать до нулевого объёма? Ответ поясните.
- 5 Объясните закон Гей-Люссака с точки зрения молекулярной теории.

Упражнения

- 1 Как изменится объём идеального газа, если его абсолютную температуру уменьшить в два раза при неизменном давлении?
- 2 Как изменится абсолютная температура идеального газа, если объём сосуда, в котором он находится, изобарически увеличить в три раза?
- 3 При температуре 27 °C газ занимает объём 5 л. Какой объём займёт этот газ при температуре 87 °C, если его давление останется неизменным?
- *4 Нарисуйте примерные графики зависимостей объёма от абсолютной температуры для двух одинаковых идеальных газов 1 и 2 одной и той же массы при их изобарическом нагревании в двух сосудах при различных давлениях ($p_1 > p_2$).

-  5 Нарисуйте примерные графики зависимостей объёма от абсолютной температуры для двух одинаковых идеальных газов 1 и 2 различной массы ($m_1 > m_2$), нагреваемых изобарически в двух сосудах при одинаковых давлениях ($p_1 = p_2$).
-  6 Подготовьте реферат об истории открытия газовых законов, используя справочники, энциклопедии, материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Бойля-Мариотта.

§ 25

Объединённый газовый закон

Пусть в гофрированном сосуде объёмом V_1 в системе, изображённой на рис. 43, газ находится в состоянии теплового равновесия и имеет давление p_1 и абсолютную температуру T_1 . Переведём этот газ в другое равновесное состояние, при котором его давление будет равно p_2 , а объём — V_2 .

Для этого вначале медленно, изохорно (при $V_1 = \text{const}$), будем нагревать (или остужать) газ, чтобы его давление изменилось от p_1 до p_2 . Температура газа при этом изменится от T_1 до T . В соответствии с законом Шарля отношение давления газа к его температуре не изменится, так как $V_1 = \text{const}$:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T}. \quad (1)$$

После этого медленно, изобарически (при $p_2 = \text{const}$), изменим объём газа от V_1 до V_2 . При этом температура газа изменится от T до T_2 . По закону Гей-Люссака отношение объёма газа к его температуре при таком процессе будет оставаться неизменным, так как $p_2 = \text{const}$:

$$\frac{V_1}{T} = \frac{V_2}{T_2}. \quad (2)$$

Выразим значение промежуточной температуры T из уравнения (2) и подставим в уравнение (1):

$$T = \frac{V_1}{V_2} \cdot T_2; \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{V_1 \cdot T_2}.$$

Умножив обе части полученного уравнения на V_1 , приведём это соотношение к виду:

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

Полученный нами результат показывает:

при переходе идеального газа данной массы из одного состояния термодинамического равновесия в другое произведение его давления на объём, делённое на абсолютную температуру газа, остаётся постоянным:

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

Данное соотношение называют *объединённым газовым законом* для идеального газа. Оно связывает между собой три макроскопических параметра, описывающих состояние теплового равновесия идеального газа: давление p , объём V и температуру T .

Любой равновесный процесс, при котором один из макроскопических параметров остаётся постоянным, называют изопроцессом.

Из объединённого газового закона легко вывести рассмотренные ранее законы для различных изопроцессов.

Действительно, из выражения, описывающего объединённый газовый закон, следует:

если $T = \text{const}$ (изотермический процесс), то $p \cdot V = \text{const}$ — закон Бойля — Мариотта;

если $V = \text{const}$ (изохорный процесс), то $\frac{p}{T} = \text{const}$ — закон Шарля;

если $p = \text{const}$ (изобарный процесс), то $\frac{V}{T} = \text{const}$ — закон Гей-Люссака.

Итоги

При переходе идеального газа данной массы из одного состояния термодинамического равновесия в другое произведение его давления на объём, делённое на абсолютную температуру газа, остаётся постоянным:

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

Это соотношение называют *объединённым газовым законом*.

Любой равновесный процесс, при котором один из макроскопических параметров остаётся постоянным, называют изопроцессом.

Вопросы

- 1 Какие макроскопические параметры, описывающие состояние теплового равновесия газа, связывает между собой объединённый газовый закон?
- 2 Какие законы используют при выводе объединённого газового закона?
- 3 Можно ли перевести идеальный газ, находящийся в состоянии теплового равновесия при давлении p_1 и температуре T_1 , в равновесное состояние, при котором его давление будет равно p_2 , а объём равен V_2 ? Как это сделать? Можете ли вы предложить другие способы перевода этого газа из данного начального состояния в конечное?

Упражнения

- 1 Определите, во сколько раз изменится абсолютная температура идеального газа при увеличении его давления в шесть раз и одновременном увеличении его объёма в два раза.
- 2 Определите конечную температуру идеального газа при уменьшении его объёма в четыре раза и одновременном увеличении его давления в два раза, если первоначально газ находился при нормальных условиях.
- 3 Определите начальное давление p_1 газа, если после уменьшения его объёма в пять раз и при одновременном изменении его температуры от $t_1 = 27^\circ\text{C}$ до $t_2 = 127^\circ\text{C}$ его давление стало равным $p_2 = 1 \text{ кПа}$.
- 4 Выведите из объединённого газового закона: а) закон Бойля — Мариотта; б) закон Шарля; в) закон Гей-Люссака.
- 5 Ополосните пустую открытую пластиковую бутылку горячей водой. Плотно заверните пробку и положите бутылку на 2 ч в холодильник. Изменится ли форма бутылки за это время? Сформулируйте гипотезу перед проведением эксперимента и объясните его результаты, используя газовые законы.

§26

Применение первого закона термодинамики к изобарному и изохорному процессам

Рассмотрим идеальный газ, находящийся под поршнем в цилиндрическом сосуде. Поршень массой M и площадью S может двигаться в цилиндре без трения, а внешнее давление не изменяется и равно p_0 . При этом газ находится в состоянии термодинамического равновесия с окружающей средой.

В вертикальном направлении на поршень действуют три силы: сила тяжести $M \cdot \vec{g}$, направленная вертикально вниз; сила внешнего давления, модуль которой равен произведению внешнего давления p_0 на площадь поршня S ($F_0 = p_0 \cdot S$), она также направлена вниз; сила давления газа, находящегося под поршнем, она направлена вертикально вверх и равна по модулю произведению давления p газа на площадь поршня S :

$$F = p \cdot S.$$

В состоянии равновесия сумма этих сил равна нулю:

$$F - F_0 - M \cdot g = 0, \text{ или}$$

$$p \cdot S - p_0 \cdot S - M \cdot g = 0.$$

Значения сил тяжести и внешнего давления записаны со знаком «минус», так как их направления противоположны направлению силы давления газа.

Следовательно,

$$p = p_0 + \frac{M \cdot g}{S}.$$

Происходящий с газом процесс будем считать равновесным. Тогда в каждый момент времени вся система будет находиться в состоянии термодинамического равновесия. В этом случае сумма всех сил, действующих на поршень, в любой момент времени будет оставаться постоянной и равной нулю. Следовательно, давление газа на протяжении всего равновесного процесса будет равно $p = p_0 + \frac{M \cdot g}{S}$. Таким образом, любой равновесный процесс в рассматриваемой системе будет изобарным.

Возможны два варианта изобарного процесса. Рассмотрим их по отдельности.

Изобарное расширение

Будем медленно нагревать газ в цилиндре, передавая ему некоторое количество теплоты Q от более нагретого тела, например от пламени го-

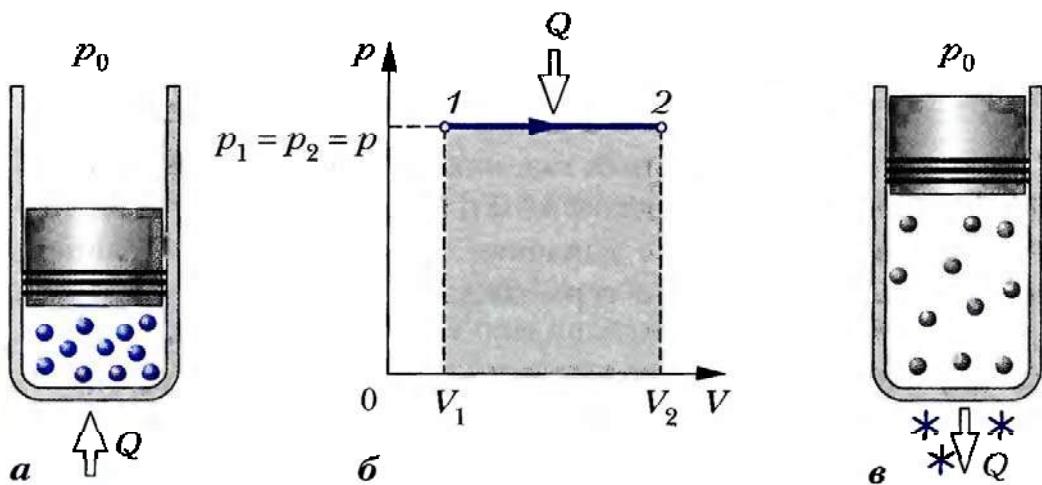


Рис. 52 Процессы изобарного расширения (*а*, *б*) и сжатия (*в*) газа, находящегося в цилиндре под поршнем

релки (рис. 52, *а*). Увеличение температуры газа при постоянном давлении p приведёт к увеличению его объёма от начального значения V_1 до конечного V_2 . График зависимости давления p газа от объёма V приведён на рис. 52, *б*.

Пусть при переходе газа из состояния 1 в состояние 2 поршень поднялся на расстояние l . Тогда постоянная сила F давления газа, действующая на поршень, совершила за это время работу $A = F \cdot l$.

Работа A совершена силой давления газа, поэтому её называют работой газа. В рассмотренном случае сила F направлена туда же, куда переместился поршень. Поэтому совершённая газом работа положительна.

Таким образом, *при расширении (т. е. при увеличении объёма) газ совершает положительную работу*.

Рассчитаем, чему она равна.

Сила давления газа постоянна: $F = p \cdot S$. Перемещение поршня l связано с изменением объёма газа: $V_2 - V_1 = l \cdot S$. Поэтому $l = \frac{V_2 - V_1}{S} = \frac{\Delta V}{S}$. Следовательно, искомая работа газа $A = F \cdot l = p \cdot S \cdot \frac{\Delta V}{S} = p \cdot \Delta V$.

! Работа A , совершённая газом при его изобарном расширении, равна произведению давления p газа на изменение его объёма ΔV .

Легко видеть, что работа $A = p \cdot \Delta V$ численно равна площади закрашенного прямоугольника на рис. 52, *б*. Другими словами, работа численно равна площади под графиком зависимости давления от объёма.

Применим первый закон термодинамики к рассмотренному нами изобарному процессу перехода идеального газа из состояния 1 в состояние 2. Пусть начальное значение внутренней энергии газа равно U_1 , а конечное — U_2 . Газ в процессе 1–2 получает количество теплоты Q и совершает положительную работу A . Поэтому в данном случае первый закон термодинамики может быть записан в виде:

$$U_1 + Q - A = U_2.$$

Из полученного соотношения следует, что в процессе 1–2 внутренняя энергия газа увеличивается за счёт полученного количества теплоты Q , но уменьшается в результате совершения газом работы A .

Вместе с тем в процессе 1–2 при неизменном давлении p объём газа увеличивается. Следовательно, в соответствии с законом Гей-Люссака увеличивается и температура газа. Увеличение температуры газа означает увеличение кинетической энергии хаотического движения молекул, а значит, и увеличение его внутренней энергии. Поэтому конечная внутренняя энергия газа больше начальной: $U_2 > U_1$.

Следовательно, $Q - A > 0$ и $Q > A$. Таким образом, мы приходим к следующему выводу:

! при изобарном расширении полученное газом количество теплоты Q больше, чем совершая этаим газом работа A . Их разность равна **увеличению внутренней энергии газа**:

$$Q - A = U_2 - U_1.$$

Изобарное сжатие

Для того чтобы изобарно сжать газ под поршнем, надо привести его в контакт с менее нагретым телом (рис. 52, в). В этом случае газ отдаст некоторое количество теплоты Q . Его температура понизится, а следовательно, уменьшится его внутренняя энергия от начального значения U_1 до конечного U_2 ($U_2 < U_1$).

Ясно, что при сжатии, т. е. при уменьшении объёма, газ будет совершать отрицательную работу. Действительно, сила давления газа под поршнем всегда направлена от газа к поршню. Поэтому при движении поршня внутрь цилиндра и уменьшении объёма газа направление этой силы противоположно перемещению поршня. В результате работа газа при его сжатии будет **отрицательной**: $A < 0$.

Иногда, в случае если *сам газ совершил отрицательную работу*, говорят, что *над газом была совершена положительная работа*.

Поскольку газ отдал количество теплоты Q и над ним совершили работу A , то согласно первому закону термодинамики:

$$U_1 - Q + A = U_2.$$

Из этого уравнения следует, что внутренняя энергия газа уменьшается в результате отдачи количества теплоты Q , но увеличивается по причине совершения над газом положительной работы. Так как внутренняя энергия при изобарном сжатии уменьшается ($U_2 < U_1$), то отданное газом количество теплоты Q больше работы A ($Q > A$). Можно сказать, что газ в результате теплообмена теряет больше энергии, чем приобретает в результате совершения над ним работы.



При изобарном сжатии газа отданное газом количество теплоты Q больше, чем совершённая над этим газом работа A . Разность работы A и отданного количества теплоты Q отрицательна и равна изменению внутренней энергии газа:

$$A - Q = U_2 - U_1 < 0.$$

Теперь рассмотрим газ в сосуде, объём которого не изменяется. К примеру, это может быть сосуд, рассмотренный выше, но с неподвижным (закреплённым) поршнем (рис. 53, *a*).

Понятно, что медленное нагревание (или охлаждение) газа в таком сосуде будет происходить при постоянном объёме, т. е. изохорно. Рассмотрим эти процессы.

Изохорное нагревание

Приведём сосуд с закреплённым поршнем в контакт с более нагретым телом (рис. 53, *a*). Температура газа будет повышаться. Следовательно, бу-

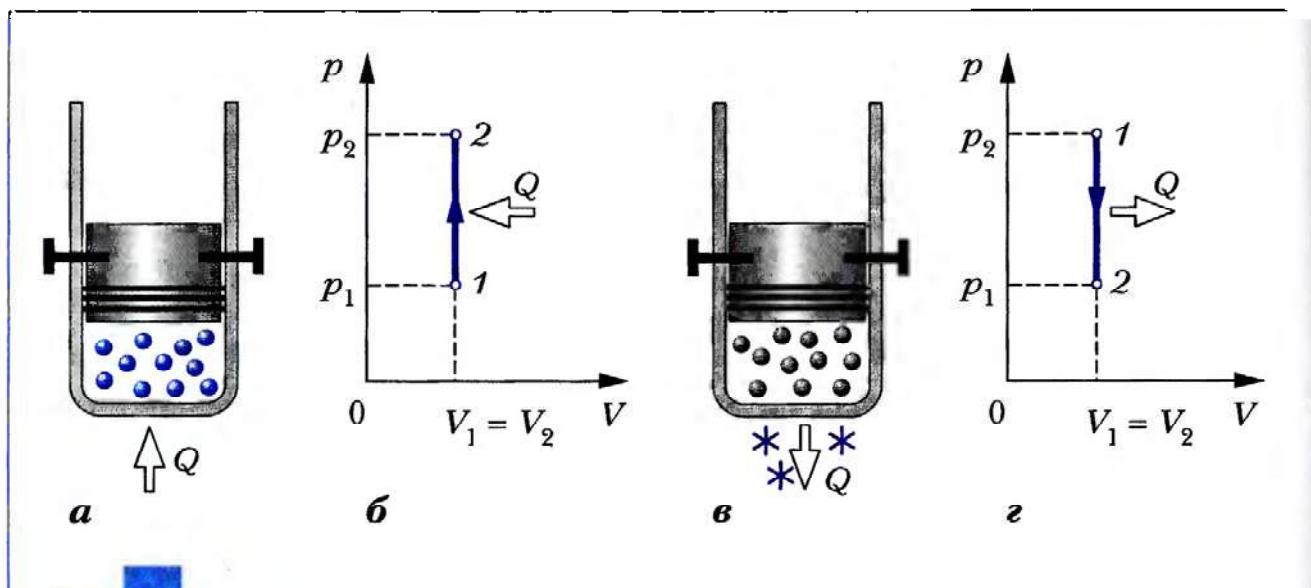


Рис. 53

Процессы изохорного нагревания (*a*, *b*) и охлаждения (*c*, *d*) газа, находящегося в цилиндре под поршнем

дет увеличиваться и внутренняя энергия газа. В соответствии с законом Шарля при этом будет увеличиваться и давление газа. График изохорного перехода газа из начального состояния 1 в конечное состояние 2 приведён на рис. 53, б.

В рассматриваемом процессе поршень, на который действует сила давления газа, неподвижен. Поэтому его перемещение равно нулю. Следовательно, равна нулю и работа газа: $A = F \cdot l = F \cdot 0 = 0$. Отметим, что равна нулю и площадь под графиком зависимости p газа от его объёма V (см. рис. 53, б).

В этом случае, так как работа газа равна нулю и он получил количество теплоты Q , согласно первому закону термодинамики: $U_1 + Q = U_2$.

! При изохорном нагревании всё полученное газом количество теплоты идёт на увеличение его внутренней энергии.

Изохорное охлаждение

Приведём сосуд с закреплённым поршнем в контакт с менее нагретым телом (рис. 53, в). Уменьшение температуры газа по закону Шарля будет сопровождаться уменьшением давления газа в сосуде. Одновременно будет уменьшаться и внутренняя энергия газа. График изменения давления p при изохорном охлаждении от начального состояния 1 до конечного состояния 2 приведён на рис. 53, г.

Так как поршень неподвижен, работа A газа в этом процессе равна нулю. Равна нулю и площадь под графиком зависимости давления p газа от его объёма V .

Поскольку работа газа равна нулю и он отдаёт количество теплоты Q , то согласно первому закону термодинамики: $U_1 - Q = U_2$.

! Изохорное охлаждение газа приводит к уменьшению его внутренней энергии U на величину, равную отданному газом количеству теплоты Q .

Вопросы

- 1 Увеличивается или уменьшается внутренняя энергия идеального газа при:
 - а) изохорном нагревании; б) изохорном охлаждении; в) изобарном расширении; г) изобарном сжатии?
- 2 Положительна, отрицательна или равна нулю работа идеального газа при:
 - а) изохорном нагревании; б) изохорном охлаждении; в) изобарном расширении; г) изобарном сжатии?

- 3 Отдаёт или получает количество теплоты идеальный газ при:
а) изохорном нагревании; б) изохорном охлаждении; в) изобарном расширении; г) изобарном сжатии?

Упражнение

Определите изменение внутренней энергии идеального газа при: а) изохорном нагревании, если он получил количество теплоты Q ; б) изохорном охлаждении, если он отдал количество теплоты Q ; в) изобарном расширении, если он получил количество теплоты Q , а его объём при давлении p увеличился на ΔV ; г) изобарном сжатии, если он отдал количество теплоты Q , а его объём при давлении p уменьшился на ΔV .

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Идеальным называют газ, между молекулами которого отсутствуют силы взаимного притяжения и среднее расстояние между молекулами многое больше размеров молекул.

Реальный газ при условиях, близких к нормальным, можно считать идеальным газом.

Состояние термодинамического равновесия газа данной массы описывают с помощью макроскопических параметров: давления p , объёма V и температуры T .

Объединённый газовый закон

При переходе идеального газа данной массы из одного состояния термодинамического равновесия в другое произведение его давления на объём, делённое на абсолютную температуру газа, остаётся постоянным:

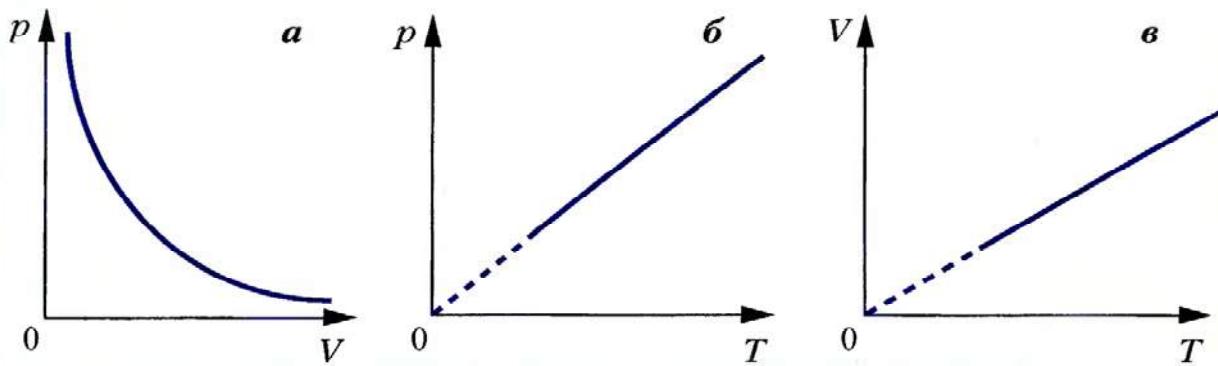
$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const.}$$

Из объединённого газового закона можно вывести законы, связанные макропараметры при изопроцессах для идеального газа данной массы:

если $T = \text{const}$ (*изотермический процесс*), то $p \cdot V = \text{const}$ – закон Бойля – Мариотта (а);

если $V = \text{const}$ (*изохорный процесс*), то $\frac{p}{T} = \text{const}$ – закон Шарля (б);

если $p = \text{const}$ (*изобарный процесс*), то $\frac{V}{T} = \text{const}$ – закон Гей-Люссака (в).



Основной источник энергии, используемый человечеством, — это внутренняя энергия топлива. Как вы уже знаете (см. § 16), горение топлива сопровождается выделением теплоты. Преобразование теплоты в механическую энергию осуществляется при помощи специальных устройств — *тепловых двигателей*.

За счёт такого преобразования тепловые двигатели совершают механическую работу. Для этого выделяющуюся при сгорании топлива или при ядерных реакциях теплоту передают путём теплообмена *рабочему веществу* двигателя. Обычно в качестве рабочего вещества используют пар или газ. Расширяясь при нагревании, рабочее вещество совершает работу против внешних сил, приводя в движение различные устройства.

Ещё один класс тепловых машин — это *холодильные машины*, которые предназначены для охлаждения (например, бытовой холодильник, кондиционер). Они также совершают работу, но уже с другой целью — для уменьшения температуры тел.



Все известные тепловые машины можно разделить на два класса: тепловые двигатели и холодильные машины.

Первая тепловая машина, *поршневой паровой двигатель*, была создана в 1765 г. Иваном Ползуновым (1728–1766). Машина развивала мощность 29 кВт. Более совершенным оказался поршневой паровой двигатель, созданный и запатентованный в 1784 г. Джеймсом Уаттом (1736–1819). Хотя в настоящее время такие тепловые машины практически не используются, их создание сыграло в прошлом огромную роль в развитии промышленности и техническом прогрессе.

Поршневые паровые машины в течение XX в. были вытеснены более компактными и экономичными поршневыми двигателями внутреннего сгорания, паровыми и газовыми турбинами, турбореактивными и реактивными двигателями.

В этой главе мы рассмотрим основные типы тепловых машин.

§ 27

Поршневые двигатели внутреннего сгорания

В поршневых двигателях внутреннего сгорания происходит сгорание топлива непосредственно в цилиндре. Для таких двигателей не нужны громоздкие паровые котлы с топками, которые использовались в паровых двигателях. Поэтому двигатели внутреннего сгорания имеют по сравнению с паровыми машинами меньшие габариты и больший коэффициент полезного действия (КПД). В настоящее время известно несколько типов поршневых двигателей внутреннего сгорания. В качестве горючего в них обычно используют бензин, природный газ или дизельное топливо.

Рассмотрим работу наиболее распространённых в настоящее время четырёхтактных двигателей с зажиганием от электрической искры горючей смеси из воздуха и паров бензина или газа.

На рис. 54 показан в разрезе один из цилиндров такого двигателя. Внутри цилиндра 1 перемещается поршень 2, который соединён с коленчатым валом 3 с помощью шатуна 4. На коленчатом валу закреплён массивный маховик 5, сглаживающий неравномерность вращения вала и обеспечивающий вывод поршня из крайних положений. В крышке цилиндра находятся два клапана: впускной 6 и выпускной 7. Здесь же установлена электрическая свеча 8.

Для запуска двигателя необходимо тем или иным способом привести во вращение его коленчатый вал, в результате чего поршень будет перемещаться то вверх, то вниз. Каждый ход поршня вверх или вниз называют *тактом* работы двигателя. Двигатель работает по четырёхтактной схеме (рис. 55).

Во время *первого такта (впуск)* поршень из крайнего верхнего положения (верхней мёртвой точки) начинает опускаться вниз (рис. 55, а). При этом открывается впускной клапан и горючая смесь поступает в цилиндр. После того как поршень достигает крайнего нижнего положения (нижней мёртвой точки), впускной клапан закрывается, и начинается *второй такт — сжатие*.

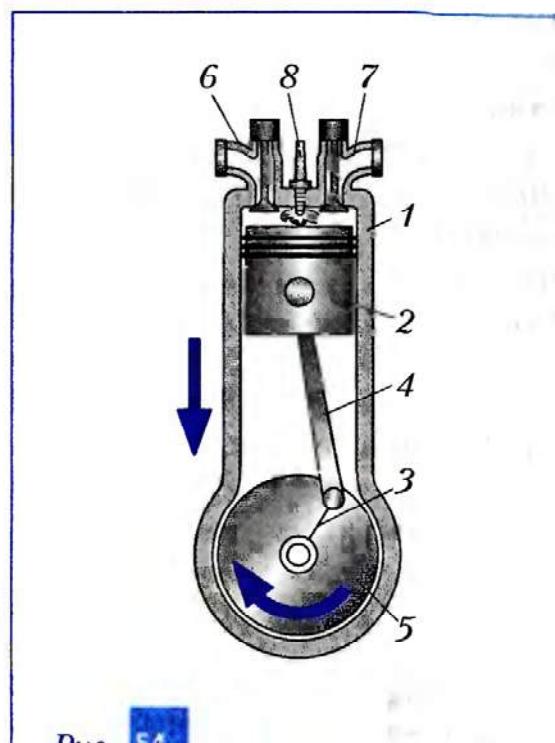


Рис. 54

Устройство поршневого двигателя внутреннего сгорания

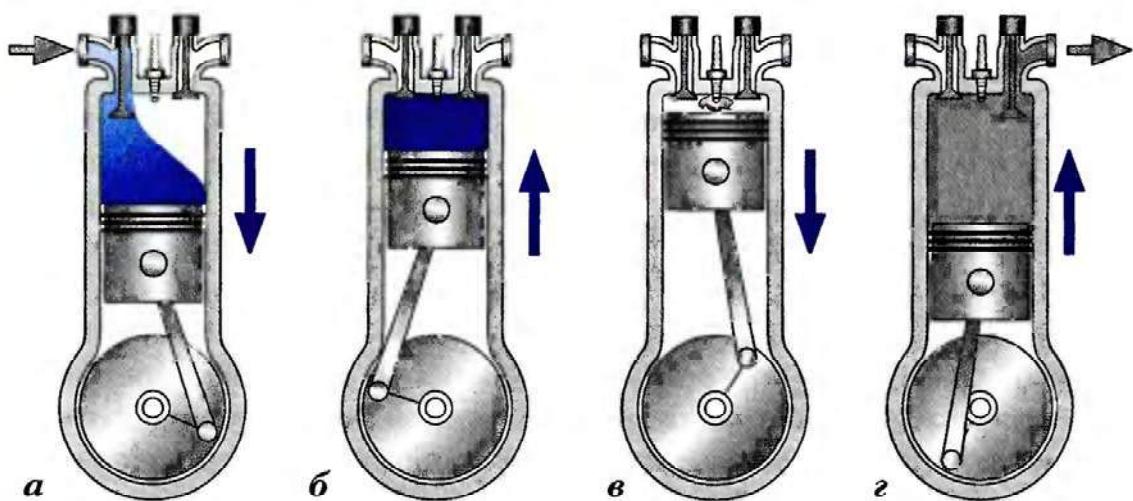


Рис. 55 Схема работы четырёхтактного поршневого двигателя

Во время второго такта (рис. 55, б) оба клапана закрыты. Поршень движется вверх, сжимая горючую смесь. При этом смесь нагревается до 300–500 °С, так как над ней производится работа. Как только поршень достигает верхней мёртвой точки, начинается *третий такт – рабочий ход*.

В начале этого такта (рис. 55, в) в свече зажигания проскаивает искра. Горючая смесь быстро (за 1–2 мс) сгорает, и температура газов повышается до 1600–2000 °С, а давление в цилиндре возрастает до 2–4 МПа. Под действием этого давления поршень движется вниз, толкая через шатун коленчатый вал. При этом *продукты горения совершают механическую работу и охлаждаются* до температуры 600–1000 °С как за счёт совершения работы, так и за счёт теплопередачи деталям двигателя. (Чтобы избежать перегрева этих деталей, их специальным образом охлаждают.) Когда поршень достигает нижней мёртвой точки, давление в цилиндре падает до 0,3–0,5 МПа, и начинается *четвёртый такт – выпуск*.

Во время этого такта (рис. 55, г) поднимающийся вверх поршень через открытый выпускной клапан выталкивает продукты сгорания в атмосферу и возвращается в верхнюю мёртвую точку. После этого начинается новый цикл работы двигателя.

Таким образом, один цикл работы рассмотренного двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала.

! Газ совершает положительную работу только во время *рабочего хода*. Во время остальных трёх тактов работу совершают поршень.

Обычно такой двигатель имеет четыре цилиндра, в каждом из которых поочерёдно происходит сгорание горючей смеси. Благодаря этому коленчатый

и на всём времени получает энергию от одного из поршней. Существуют двигатели, имеющие 8 и даже 16 цилиндров. В этих двигателях достигается большая равномерность вращения коленчатого вала, и они имеют большие мощности.

КПД рассмотренного типа двигателей зависит от полноты сгорания топлива и степени сжатия горючей смеси, т. е. от отношения объёмов смеси в цилиндре в начале и в конце второго такта. **К**

С В 1897 г. немецкий инженер Рудольф Дизель создал двигатель, названный позднее его именем, в котором горючее впрыскивается в цилиндр при помощи топливного насоса и воспламеняется от контакта с сильно разогретым воздухом. Дизель предложил использовать степень сжатия более 10. Чтобы избежать при этом детонации (самопроизвольного воспламенения), цилиндр заполняют чистым воздухом. К концу второго такта воздух в цилиндре за счёт сжатия в 16–20 раз нагревается до температуры 600–800 °С. В этот момент горючее впрыскивают в цилиндр и оно воспламеняется. При этом процесс горения протекает более плавно, чем при искровом зажигании, и удается обеспечить более полное сгорание топлива. К достоинствам дизелей относится не только их большая экономичность, но и возможность использования более дешёвых сортов топлива: дизельного топлива, керосина и даже нефти, а также отсутствие в них специальных систем зажигания. Длительное время дизели из-за их массивности устанавливали только на тракторы, тяжёлые автомобили и суда, в том числе и на подводные лодки. В настоящее время, используя современные материалы и технологии, удалось создать достаточно компактные и лёгкие дизели для легковых автомобилей. **С**

К В современных бензиновых двигателях даже при использовании специальных добавок к бензину не удается получить коэффициент сжатия больше 8–9. Этому препятствует то, что при больших коэффициентах сжатия горючая смесь самовоспламеняется (детонирует) до подхода поршня к верхней мёртвой точке во время второго такта работы. В результате не только нарушается работа двигателя, но и может произойти его разрушение.

Итоги

Преобразование теплоты в механическую энергию осуществляется при помощи специальных устройств – *тепловых двигателей*.

Двигатели внутреннего сгорания работают по четырёхтактной схеме: 1 – впуск рабочего вещества в цилиндр; 2 – сжатие; 3 – рабочий ход; 4 – выпуск.

Газ совершает положительную работу только во время рабочего хода. Во время остальных трёх тактов работу над газом совершают поршень.

КПД двигателей зависит от полноты сгорания топлива и степени сжатия горючей смеси.

Вопросы

- 1 Каково назначение теплового двигателя?
- 2 Какие типы тепловых двигателей вы знаете?
- 3 Почему паровые двигатели были вытеснены поршневыми двигателями внутреннего сгорания?
- 4 Расскажите об устройстве поршневых четырёхтактных двигателей внутреннего сгорания.
- 5 Из каких тактов состоит цикл работы четырёхтактного двигателя? Сколько оборотов делает коленчатый вал за один рабочий цикл? Какие процессы происходят во время каждого из тактов?
- 6 Какую роль играет маховик в поршневом двигателе?
- 7 Почему детали двигателя внутреннего сгорания требуют непрерывного охлаждения при работе?
- *8 Почему внутреннюю энергию топлива в тепловом двигателе нельзя полностью превратить в механическую работу?
- 9 Чем отличаются двигатели Дизеля от двигателей с искровым зажиганием? Какие преимущества и недостатки этих двигателей вы знаете?

Упражнения

- ✓ 1 Подготовьте реферат о первых поршневых паровых машинах, их изобретателях и о применении их изобретений.
- 👥 2 Сделайте сообщение о дизельных двигателях, используя материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Дизельный_двигатель. Расскажите об истории создания дизельного двигателя, о его разновидностях и преимуществах по сравнению с бензиновыми.

§ 28

Паровые и газовые турбины. Турбореактивные двигатели и реактивные двигатели ракет

В современной технике огромную роль играют паровые и газовые турбины. В настоящее время в мире с помощью паровых турбинрабатывается примерно 70 % всей потребляемой электроэнергии. Газовые турбины за последние десятилетия всё чаще используются вместо поршневых двигателей внутреннего сгорания на самолётах, кораблях и гоночных автомобилях. Это связано с тем, что при использовании современных технологий газотурбинные двигатели мощностью более 200–500 кВт удаётся сделать компактными и лёгкими. Валы турбин не испытывают ударных нагрузок, которые неизбежны в поршневых двигателях в начале каждого рабочего хода. Кроме того, в газотурбинных двигателях потери механической энергии из-за трения значительно меньше, чем в поршневых двигателях.

Первая паровая турбина, нашедшая практическое применение, была создана шведским инженером Карлом Лавалем в 1889 г. Упрощённый вариант ротора (вращающейся части) такой турбины показан на рис. 56. Ротор состоит из вала 1 с диском 2, по ободу которого расположены лопатки 3. На эти лопатки через специальные сопла 4 из парового котла подаётся пар. Сопла имеют такую форму, что выходящий из них пар интенсивно расширяется. При этом температура и давление пара уменьшаются, а пар вылетает из сопел с большой скоростью. Таким образом, внутренняя энергия пара преобразуется в кинетическую энергию его струй. При взаимодействии струй пара

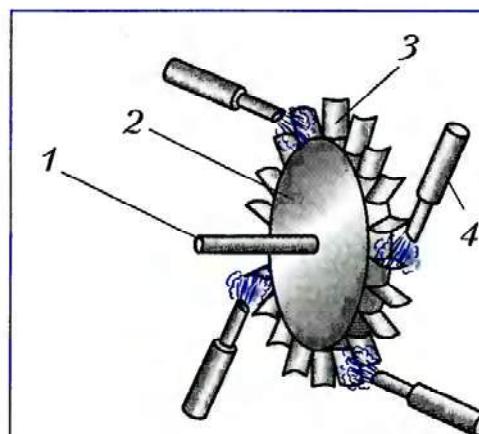


Рис. 56 Ротор паровой турбины

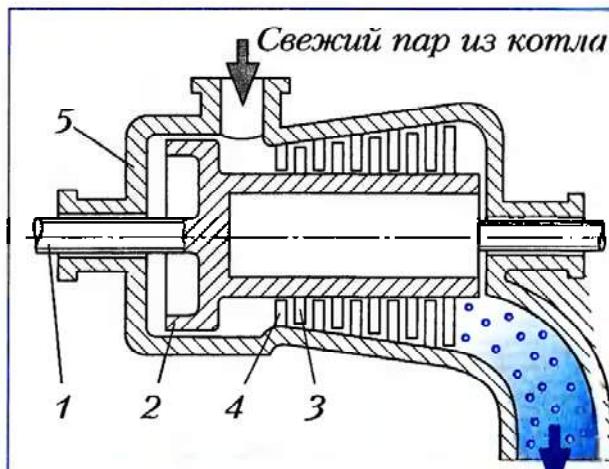


Рис. 57 Основные узлы паровой турбины

с лопатками ротор быстро вращается и энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора.

Для повышения коэффициента полезного действия роторы современных турбин делают многодисковыми. На рис. 57 в разрезе показан кожух 5 паровой турбины, внутри которого находятся ротор 2 и вал 1. На кожухе (*статоре* — неподвижной части турбины) закреплены направляющие лопатки 4. Они направляют пар на рабочие лопатки 3 ротора. Пар, имеющий температуру до 580 °С, из котла под давлением 15–25 МПа поступает в кожух турбины. Пройдя первый ряд направляющих лопаток, пар со скоростью 500–1000 м/с попадает на первый ряд лопаток ротора. Несколько охладившись и расширившись за счёт понижения давления, пар через второй ряд направляющих лопаток попадает на лопатки второго диска ротора и т. д. Процесс повторяется до тех пор, пока пар не охладится примерно до 100 °С.

После этого пар выводится из турбины в охлаждаемые водой специальные устройства — *конденсаторы*, где он конденсируется. Полученная в результате конденсации пара вода специальным насосом закачивается обратно в паровой котёл. Нагревшаяся же в конденсаторе вода, охлаждавшая пар, подаётся в систему бытового и промышленного теплоснабжения.

Необходимый для работы турбины пар на тепловых электростанциях получают в котлах, нагреваемых за счёт сжигания топлива. На атомных электростанциях нагревание воды осуществляется за счёт теплоты, выделяющейся в атомных реакторах этих станций.

В газовых турбинах вместо пара используют продукты сгорания жидкого (или газообразного — в стационарных установках) топлива. Устройство газотурбинного двигателя показано на рис. 58. Такой двигатель состоит из воздушного компрессора, который нагнетает воздух в зону сгорания топлива, камеры сгорания и газовой турбины.

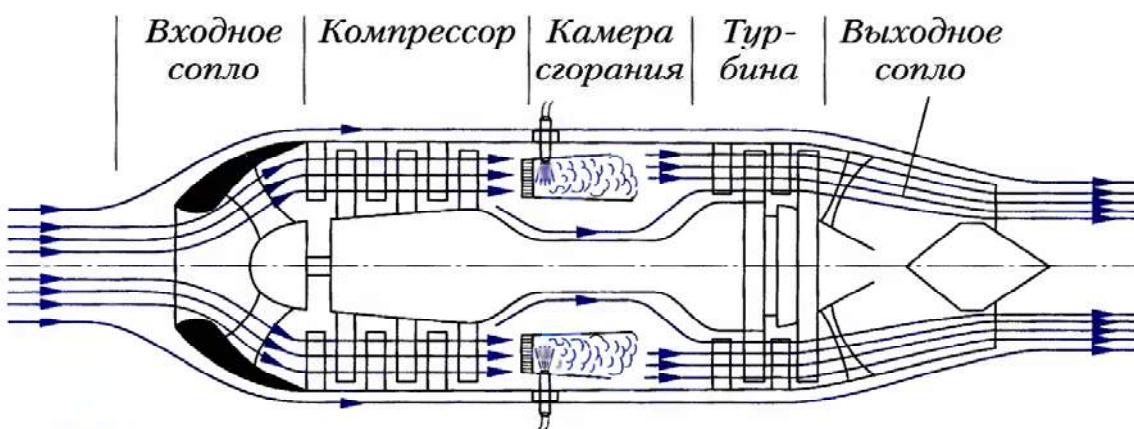


Рис. 58 Схема устройства газотурбинного двигателя

Ротор компрессора смонтирован на том же валу, что и ротор турбины. Поэтому и компрессор, и турбина работают одновременно и запускаются в работу специальным пусковым устройством — стартёром.

Как и в паровой турбине, роторы компрессора и газовой турбины имеют несколько дисков с рабочими лопатками. Между этими дисками располагаются диски с направляющими лопатками. Рабочие лопатки ротора компрессора имеют такую форму, что при их вращении давление воздуха перед компрессором понижается, а за ним возрастает в 5–8 раз. При этом воздух, поступающий в турбину через входное устройство, нагревается до 200–250 °C.

Сжатый воздух поступает в камеру сгорания. Одновременно в эту камеру через форсунки под большим давлением подаётся топливо. Из камеры сгорания нагретый до 800–1000 °C газ (продукт сгорания) поступает на рабочие лопатки турбины. В мощных газовых турбинах на каждую рабочую лопатку газ действует силой около 100 кН, при этом скорость вращения ротора может достигать 5000 оборотов в минуту. При прохождении через ротор турбины продукты сгорания охлаждаются до температуры 450–550 °C, и они через выходное сопло выбрасываются в атмосферу.

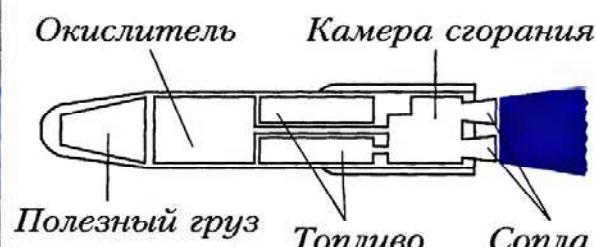
! Таким образом, в газотурбинной установке реализуются те же четыре такта, что и в поршневых двигателях внутреннего сгорания: всасывание воздуха, его сжатие, сгорание топлива и выпуск. Разница лишь в том, что в поршневых двигателях эти такты осуществляются в одном и том же месте (цилиндре), но в разные моменты времени. В газотурбинных двигателях эти такты происходят одновременно, но в разных частях двигателя.

При использовании газотурбинных двигателей на кораблях и самолётах, приводимых в движение при помощи винта, механическая энергия турбины передаётся на винт. Одновременно с этим ротор турбины вращает и ротор компрессора, обеспечивая двигатель сжатым воздухом.

При использовании газотурбинного двигателя в реактивных самолётах сила тяги создаётся лишь за счёт реактивной силы вылетающей струи газа. В этом случае турбина вращает только ротор компрессора. Такие двигатели называют *турбореактивными*. Самолёты с такими двигателями способны развивать скорость, в два-три раза большую скорости звука.

На ракетах, предназначенных для вывода на орбиту спутников и для межпланетных полётов, используют реактивные двигатели, работающие на жидком топливе, — жидкостные реактивные двигатели (ЖРД).

В турбореактивных двигателях для окисления топлива используют поступающий извне кислород воздуха. В отличие от них в двигателях ракет, которые работают на жидком топливе, необходимый для работы окисли-



Rис. 59

Большинство реактивных двигателей работают на жидком топливе

где m – масса газа, выбрасываемого из двигателя со скоростью v за время t .

Из приведённой формулы видно, что при одной и той же массе m сила тяги прямо пропорциональна скорости выброса продуктов горения, т. е. зависит от их кинетической энергии.

Для увеличения скорости выбрасываемой струи газа соплу реактивного двигателя придают специальную форму. Кроме того, выбирают топливо, обеспечивающее возможно большую температуру в камере сгорания, так как с ростом этой температуры увеличивается скорость выброса продуктов горения.

Итоги

В паровой турбине ротор вращается за счёт взаимодействия струй пара с лопatkами. При этом энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора.

Газотурбинный двигатель состоит из воздушного компрессора, который нагнетает воздух в зону сгорания топлива, камеры сгорания и газовой турбины.

В газотурбинной установке реализуются те же четыре такта, что и в поршневых двигателях внутреннего сгорания: всасывание воздуха, его сжатие, сгорание топлива и выпуск. Разница лишь в том, что в поршневых двигателях эти такты осуществляются в одном и том же месте (цилиндре), но в разные моменты времени, а в газотурбинных двигателях эти такты происходят одновременно, но в разных частях двигателя.

При использовании газотурбинных двигателей на кораблях и самолётах, приводимых в движение при помощи винта, механическая энергия турбины передаётся на винт.

тель (чаще всего жидкий кислород) размещают на самой ракете в специальном баке (рис. 59).

Реактивная сила (иначе – сила тяги) теплового двигателя ракеты создаётся только за счёт выбрасывания из двигателя продуктов сгорания топлива. Согласно законам Ньютона модуль развиваемой таким двигателем силы тяги равен:

$$F = \frac{m \cdot v}{t},$$

При использовании газотурбинного двигателя в реактивных самолётах сила тяги создаётся лишь за счёт реактивной силы вылетающей струи газа. Такие двигатели называют *турбореактивными*.

Реактивная сила (сила тяги) теплового двигателя ракеты создаётся только за счёт выбрасывания из двигателя продуктов сгорания топлива.

Вопросы

- 1 Назовите основные части паровой турбины. Объясните принцип её действия.
- 2 Для чего в установках с паровыми турбинами используют конденсаторы?
- 3 Какие процессы и в каких частях газотурбинной установки происходят во время её работы?
- 4 Какие преимущества и недостатки имеют паровые и газовые турбины по сравнению с поршневыми двигателями внутреннего сгорания?
- 5 На каких видах транспорта применяют газотурбинные двигатели?
- 6 В чём различие между турбореактивным и реактивным двигателями?
- 7 Можно ли рассматривать огнестрельное оружие как тепловой двигатель?
- 8 От чего зависит сила тяги турбореактивного и реактивного двигателей?
- *9 Как и почему изменяются давление и температура газовой смеси при её прохождении через турбореактивный двигатель?
- ❶ 10 Почему поперечное сечение кожуха воздушного компрессора по мере удаления от входного устройства уменьшают, а у турбины увеличивают?

Упражнение



- Подготовьте реферат о ракетных двигателях, используя справочники, учебные энциклопедии, материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Ракетный_двигатель. Расскажите об истории их создания, разновидностях ракетных двигателей, их применении в различных областях техники.

§ 29 Коэффициент полезного действия тепловых двигателей

Преобразование внутренней энергии топлива в механическую

работу в общем случае осуществляется по схеме, изображённой на рис. 60.

Теплота, полученная за счёт сжигания топлива, от *нагревателя* в результате теплообмена *самопротивольно* передаётся *рабочему веществу*. Это возможно только в том случае, если температура T_h нагревателя превышает исходную температуру T_0 рабочего вещества.

Рабочее вещество получает от нагревателя количество теплоты Q_h . В результате оно нагревается и расширяется. Во время рабочего хода рабочее вещество совершает механическую работу. После этого его обычно удаляют, а двигатель

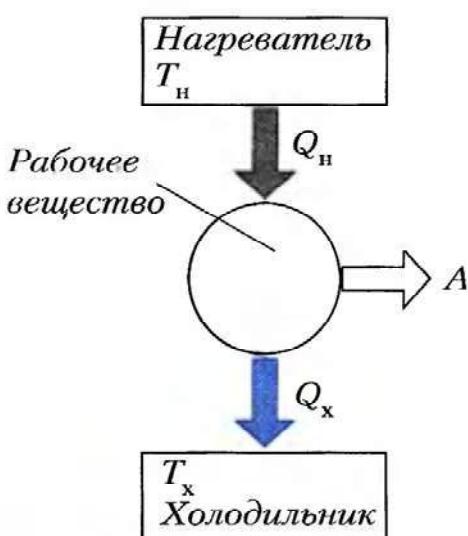


Рис. 60 Схема преобразования внутренней энергии топлива в механическую работу

возвращают в исходное состояние. Таким образом, часть энергии затрачивается на возвращение двигателя в исходное состояние (удаление отработанного вещества и введение нового), а также на преодоление сил трения в самом двигателе. Поэтому только часть количества теплоты Q_h превращается в полезную работу A , которую совершает двигатель.

! Полезная механическая работа A , совершаемая тепловым двигателем, всегда меньше работы, которую совершает рабочее вещество при расширении.

При возвращении двигателя в исходное состояние часть энергии передаётся *холодильнику* (*теплоприёмнику*), имеющему температуру T_x , меньшую T_0 . Эту часть называют количеством теплоты Q_x , переданным холодильнику.

В паровых турбинах электростанций роль холодильника выполняет конденсатор, а в остальных тепловых двигателях – окружающее пространство.

Таким образом, только часть энергии, получаемой рабочим веществом, превращается в полезную механическую работу.

! В идеальном случае полезная механическая работа теплового двигателя равна разности количества теплоты, полученного рабочим веществом от нагревателя, и количества теплоты, отданного холодильнику:

$$A = Q_h - Q_x.$$

Отношение совершённой двигателем полезной работы A к полученному от нагревателя рабочим веществом количеству теплоты Q_h , называют коэффициентом полезного действия (КПД) двигателя.

Коэффициент полезного действия обозначают греческой буквой η («эта»). В идеальном случае он равен:

$$\eta = \frac{A}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_x}{Q_h}.$$

КПД является безразмерной величиной. Часто этот коэффициент выражают в процентах. Для этого указанное отношение $\frac{A}{Q_h}$ умножают на 100 %.

Коэффициент полезного действия двигателя показывает, какая часть энергии, полученной рабочим веществом от нагревателя, пошла на совершение полезной работы.

Обратим внимание на то, что для поршневых двигателей Q_h – количество теплоты, полученное рабочим веществом за цикл работы двигателя, A – совершенная двигателем *за то же время* полезная работа. В турбинах рабочее вещество непрерывно получает теплоту, и турбина непрерывно совершает полезную работу. Поэтому КПД турбины можно определить и как отношение полезной механической мощности N , развиваемой турбиной, к тепловой мощности N_t , получаемой рабочим веществом:

$$\eta = \frac{N}{N_t}.$$

Для сравнения в таблице 9 приведены КПД ряда тепловых двигателей.

Таблица 9

Тип двигателя	КПД, %
Поршневой паровой двигатель паровоза	7–9
Карбюраторные двигатели внутреннего сгорания	20–25
Дизели	25–35
Газотурбинные двигатели	20–30
Мощные паровые турбины с конденсаторами	35–40

В 1824 г. французский учёный Никола Сади Карно (1796–1832), один из основателей термодинамики, доказал, что *максимально возможный КПД* любого теплового двигателя вне зависимости от используемого в этом двигателе рабочего вещества не может превышать величины

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_x}{T_h}, \quad (\text{формула Карно})$$

где T_h – температура нагревателя, а T_x – температура холодильника (тепло-приёмника) по шкале температур Кельвина.

Из формулы Карно следует, что для повышения КПД теплового двигателя необходимо повышать максимальную температуру рабочего вещества и добиваться максимального понижения его температуры на выходе из двигателя.

Чтобы оценить, насколько совершенны современные мощные паровые турбины, рассчитаем *максимально возможный КПД* паровой турбины, имеющей температуру пара на входе $t_h = 580^{\circ}\text{C}$, а на выходе – $t_x = 100^{\circ}\text{C}$:

$$\eta_{\max} \approx \frac{t_h - t_x}{t_h + 273} \cdot 100 \% = \frac{580 - 100}{580 + 273} \cdot 100 \% \approx 56 \%.$$

Полученное значение достаточно близко к максимальному реально достигнутому КПД мощных паровых турбин (см. таблицу 9).

Итоги

В идеальном случае полезная механическая работа теплового двигателя равна разности количества теплоты, полученного рабочим веществом от нагревателя, и количества теплоты, отданного холодильнику:

$$A = Q_h - Q_x.$$

Отношение совершённой двигателем полезной работы A к полученному от нагревателя рабочим веществом количеству теплоты Q_h называют коэффициентом полезного действия (КПД) двигателя.

В идеальном случае КПД теплового двигателя можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \frac{A}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_x}{Q_h}.$$

Коэффициент полезного действия двигателя показывает, какая часть энергии, полученной рабочим веществом от нагревателя, пошла на совершение полезной работы.

Максимально возможный КПД любого теплового двигателя вне зависимости от используемого в этом двигателе рабочего вещества не может превышать величины:

$$\eta_{\max} = \frac{T_h - T_x}{T_h} \quad (\text{формула Карно}).$$

Вопросы

- 1 Почему полезная работа теплового двигателя меньше работы, совершаемой рабочим веществом при расширении?
- 2 Чему равна полезная работа теплового двигателя в предельном идеальном случае?
- 3 Что называют КПД теплового двигателя?
- 4 Приведите примеры значений КПД тепловых двигателей.
- 5 Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя при заданных температурах нагревателя и холодильника? Зависит ли он от рода рабочего вещества двигателя?
- *6 Почему КПД реальных тепловых двигателей значительно меньше единицы (100 %)?

Упражнения

Для решения задач используйте данные из таблицы 3.

- 1 Пользуясь формулой Карно, определите максимально возможный КПД газовой турбины, если температура подаваемых к ней газов $t_1 = 2000^{\circ}\text{C}$, а температура газов на выходе из турбины $t_2 = 600^{\circ}\text{C}$.
- 2 Двигатель мотороллера, развивающий механическую мощность $N = 5 \text{ кВт}$, потребляет за $t = 2 \text{ ч}$ работы 4 кг бензина. Определите КПД этого двигателя.
- *3 Автомобиль, двигаясь равномерно и горизонтально, проехал 288 км со скоростью $v = 72 \text{ км/ч}$ и израсходовал 70 кг бензина. КПД двигателя автомобиля $\eta = 25\%$. Определите мощность N двигателя и модуль F силы сопротивления движению автомобиля.
- *4 Айсберг массой $M = 10^{10} \text{ кг}$, имеющий температуру $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$, дрейфует в Гольфстриме, температура воды в котором равна $t = 22^{\circ}\text{C}$. Какую максимальную работу могла бы произвести тепловая машина, использующая Гольфстрим в качестве нагревателя, а

айсберг в качестве холодильника, за время таяния айсберга, если бы удалось сделать её КПД равным максимально возможному?

- *5 В результате усовершенствования теплового двигателя, имевшего КПД $\eta = 0,4$, удалось увеличить количество теплоты, получаемое за цикл его рабочим веществом, на $k = 10\%$. При этом количество теплоты, отдаваемое холодильнику, не изменилось. Найдите КПД усовершенствованного двигателя.

- 6 Проанализируйте принципы работы и конструкции некоторых предлагавшихся «вечных двигателей», используя для этого материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Вечный_двигатель. Разберитесь, почему ни один из них не может работать. Сделайте сообщение.

§ 30

Холодильные машины

Вы уже знаете, что при тепловых процессах теплота самопривольно может переходить только от более нагревого тела к менее нагретому. Но каким же образом работают холодильные машины, в том числе домашние холодильники?

В настоящее время известны многие процессы, при которых происходит охлаждение тел. Например, все эндотермические химические реакции (см. § 16) сопровождаются охлаждением взаимодействующих веществ. Так, при растворении нитрата аммония в воде такой же массы температура смеси без теплообмена с окружающей средой понижается на $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вспомним также, что различные вещества охлаждаются при испарении, так как при этом происходит уменьшение кинетической энергии хаотически движущихся молекул испаряющегося вещества. *Работа большинства современных холодильных машин основана именно на этом явлении.*

В качестве рабочего вещества в таких холодильниках обычно используют аммиак или фреон. В промышленных холодильниках, как правило, применяют аммиак, а в домашних – фреон. Это связано с тем, что аммиак – ядовитый газ и его возможные утечки в жилых помещениях недопустимы.

Аммиак и фреон – легкоиспаряющиеся вещества. Они обладают большой удельной теплотой парообразования и низкой температурой кипения. При нормальном атмосферном давлении удельная теплота парообразования r аммиака близка к $1,4\text{ кДж/g}$, фреона – 170 Дж/g . Температура кипения аммиака близка к $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$, у фреона она близка к $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Рассмотрим схему работы домашнего компрессионного холодильника (рис. 61). Его основные узлы – это компрессор 1, конденсатор 2 (который

часто называют радиатором), испаритель 4 и холодильная камера 5. Компрессор приводится в действие электромотором, который на рисунке не показан.

Центральным узлом холодильника является компрессор, который с одной стороны производит сжатие фреона, а с другой — поддерживает давление в испарителе ниже атмосферного. В результате сжатия давление фреона увеличивается и он нагревается до температуры 50–80 °С. После этого фреон в газообразном состоянии подаётся в конденсатор (радиатор), расположенный на задней стенке холодильника. В процессе передачи теплоты менее нагретому воздуху комнаты фреон охлаждается почти до комнатной температуры. При этом происходит его конденсация. В жидким состоянии через капиллярную трубку (вентиль) 3 фреон под давлением поступает в испаритель 4, где за счёт работы компрессора поддерживается низкое давление. Поэтому фреон резко закипает и переходит в газообразное состояние. Его температура падает и становится ниже температуры содержимого холодильной камеры. В результате содержимое холодильной камеры отдаёт фреону количество теплоты Q_1 и охлаждается. После этого фреон из испарителя снова поступает в компрессор.

Для того чтобы температура в холодильной камере не опускалась ниже заданной, двигатель компрессора периодически отключается при помощи специального устройства. Если температура в холодильной камере поднимается выше заданной, это устройство вновь включает компрессор.

 Эффективность работы холодильника характеризуют **холодильным коэффициентом**.

Холодильным коэффициентом k_x называют отношение количества теплоты Q_1 , которое рабочее вещество холодильника отбирает от охлаждаемого тела за цикл, к работе A , которую совершают над этим рабочим веществом за тот же цикл:

$$k_x = \frac{Q_1}{A}.$$

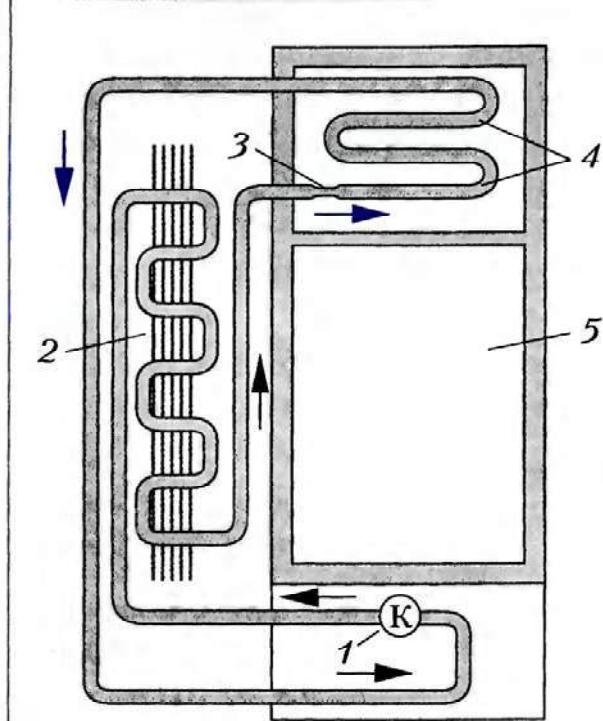


Рис. 61

Схема устройства домашнего холодильника

Холодильный коэффициент часто измеряют в процентах. Для этого указанное отношение умножают на 100 %.

При установившемся режиме работы холодильника, согласно закону сохранения энергии при тепловых процессах, количество теплоты, которое отдаёт рабочее тело радиатору, равно $Q_2 = Q_1 + A$. Поэтому холодильный коэффициент при установившемся режиме работы холодильника можно вычислить по формуле:

$$k_x = \frac{Q_1}{A} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}. \quad \text{Л}$$

Итоги

Работа большинства холодильных машин основана на явлении охлаждения веществ при их испарении.

Холодильным коэффициентом k_x называют отношение количества теплоты Q_1 , которое рабочее вещество холодильника отбирает от охлаждаемого тела за цикл, к работе A , которую совершают над этим рабочим веществом за тот же цикл:

$$k_x = Q_1/A.$$

Вопросы

- 1 Расскажите об устройстве компрессионного холодильника.
- 2 Какие вещества используют в качестве рабочих в компрессионных холодильниках?
- 3 Каково назначение конденсатора (радиатора) холодильника?
- 4 Каково назначение испарителя холодильника? Почему испаритель размещают в верхней части морозильной камеры?
- 5 Как изменяется агрегатное состояние рабочего вещества при работе холодильника?
- 6 Что называют холодильным коэффициентом холодильника?

Упражнения

- 1 Как изменится температура воздуха в комнате, если в ней начнёт работать холодильник? Рассмотрите случаи, когда дверца холодильника: а) закрыта; б) открыта.
- 2 Определите количество теплоты, которое необходимо отвести из морозильной камеры, чтобы превратить в лёд с температу-

- рой 0 °С воду массой $m = 0,5$ кг, первоначально имеющую температуру $t_0 = 20$ °С.
- 3** Холодильный коэффициент холодильника $k_x = 3$. Определите работу A , которую должен совершить компрессор этого холодильника, чтобы отвести из морозильной камеры количество теплоты $Q_1 = 300$ Дж.
- 4** Какое количество теплоты отдаст окружающему пространству радиатор холодильника из задачи 3?
- 5** Объясните, из-за чего происходит образование инея и льда в морозильной камере холодильника. За счёт чего можно уменьшить образование инея и льда на стенках камеры?

§31

Экологические проблемы использования тепловых машин

Появление тепловых машин привело к быстрому развитию промышленности. Жизнь современного человека практически немыслима без этих машин. Однако они неблагоприятно влияют на окружающую среду.

Во-первых, при сжигании топлива в атмосферу выделяется много вредных для природы и здоровья человека веществ: угарный газ, различные соединения азота, хлора и серы. Соединяясь с атмосферной влагой, они образуют различные кислоты. Огромный ущерб от кислотных дождей, уничтожающих леса, растения, посевы и животных, в настоящее время испытывают страны Северной Америки и почти всей Европы. Особенно много вредных выбросов в атмосферу дают тепловые двигатели автомобилей, самолётов и ракет. Поэтому всё большее распространение на транспорте получают электродвигатели и тепловые двигатели, работающие на водороде, так как при сгорании водорода образуется водяной пар и, следовательно, отсутствуют вредные выбросы в атмосферу. Всё большее распространение получают атомные электростанции.

Во-вторых, при сжигании топлива используется кислород из атмосферного воздуха. Если в нашей стране количество кислорода, выделяемого лесами, существенно больше того, что потребляет промышленность, то в США леса восстанавливают лишь 50–60 % потребляемого кислорода.

В-третьих, в результате работы тепловых машин в атмосферу выделяются углекислый газ и теплота (хотя она примерно в десять тысяч раз меньше поступающей на земную поверхность лучистой энергии от Солнца). Но даже такая «незначительная» прибавка теплоты может нарушить уста-

новившееся в природе равновесие и привести к изменениям климата и таянию ледников. 

Минимизировать указанные вредные воздействия на природу можно, лишь экономно расходуя все виды энергии и используя энергосберегающие технологии. Поэтому в настоящее время во всех странах уделяют большое внимание созданию двигателей, использующих теплоту геотермальных (горячих) источников самой природы, энергию морских приливов и ветра.



При тепловом балансе в природе энергия, которую получает наша планета от Солнца, равна энергии, излучаемой Землёй в космическое пространство. Выброс в атмосферу значительного количества углекислого газа приводит к так называемому парниковому эффекту, когда углекислый газ в атмосфере задерживает излучение Земли в космос. В результате температура нижнего слоя атмосферы повышается.

Вопросы

- 1 Какие вредные вещества попадают в атмосферу при сжигании топлива?
- 2 Что такое кислотные дожди и как они влияют на природу?
- 3 Что такое парниковый эффект, чем он вызван?
- 4 Назовите причины возможного изменения климата Земли, связанные с использованием тепловых машин.
- 5 Перечислите пути решения экологических проблем, возникающих из-за работы тепловых машин.

Упражнения

- 1 Перечислите известные вам виды топлива, типы тепловых двигателей и проведите их сравнение с точки зрения экологии.
-  2 Подготовьте информацию о характере воздействия различных типов тепловых двигателей на окружающую среду и об экологической обстановке в вашем регионе.



§ 32

Для дополнительного изучения

Применение законов термодинамики для описания работы теплового двигателя

Рассмотрим работу примитивного циклического теплового двигателя на примере изученных нами изопроцессов.

Представим себе, что мы строим дом и нам надо поднимать каменные блоки массой M каждый на высоту h . Пусть рабочим телом теплового дви-

рателя является идеальный газ, находящийся под очень лёгким (практически невесомым) поршнем в гладком цилиндре высотой чуть больше h (см. рис. 62). Будем считать, что внешнее атмосферное давление p_0 и давление газа под поршнем вначале были равны.

Если положить каменный блок на поршень, то под действием веса блока, равного $M \cdot g$, поршень «провалится» вниз. Поэтому вначале надо увеличить давление p_0 газа под поршнем на величину, равную весу блока, делённому на площадь S поршня:

$$p_2 = p_0 + \frac{M \cdot g}{S}.$$

Для этого закрепим поршень и подогреем находящийся под ним газ, передав ему необходимое количество теплоты Q_{12} (рис. 63) от более нагретого тела (нагревателя). Нагревание будем производить до тех пор, пока давление газа не возрастёт до нужной нам величины p_2 . График этого изохорного ($V = \text{const}$) процесса представляет собой отрезок 1–2, изображённый на рис. 64. Работа газа в процессе 1–2 равна нулю.

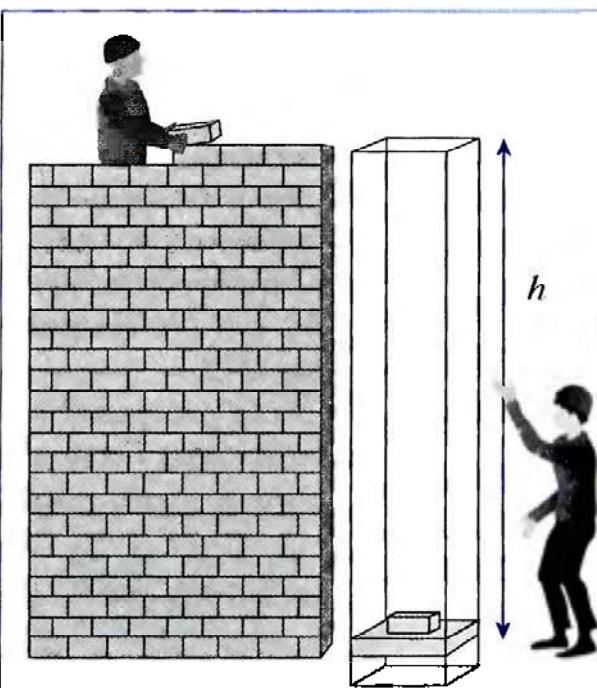


Рис. 62

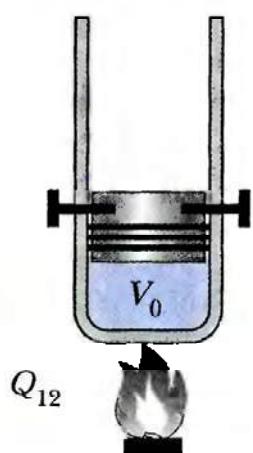


Рис. 63

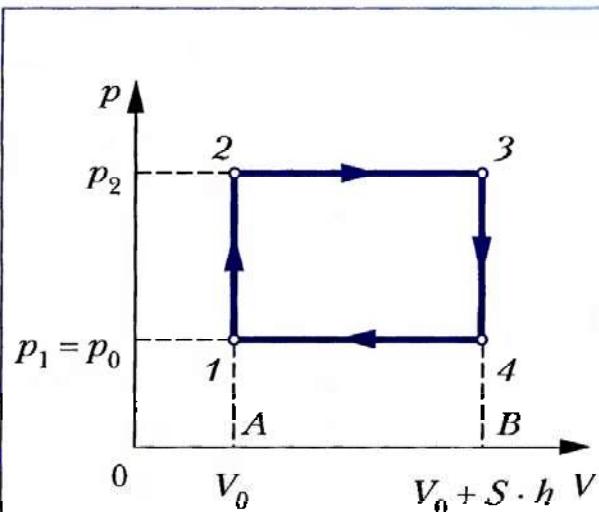


Рис. 64

Теперь мы можем положить блок на поршень и освободить поршень от креплений (состояние 2 на рис. 65).

Для того чтобы поршень поднял блок, вновь приведём всю систему в контакт с нагревателем. Система получит количество теплоты Q_{23} . В результате произойдёт изобарное расширение (процесс 2–3 на рис. 65). Газ при постоянном давлении p_2 , расширяясь, поднимет поршень с блоком на нужную высоту h . При этом объём газа изменится от начального значения V_0 до конечного $V_0 + S \cdot h$. На рис. 64 процесс изобарного расширения соответствует отрезку 2–3.

В процессе 2–3 газ совершил положительную работу A_{23} , равную произведению постоянной силы F давления газа, действующей на поршень с блоком, на перемещение h этого поршня:

$$A_{23} = F \cdot h = (p_2 \cdot S) \cdot h = \left(p_0 + \frac{M \cdot g}{S} \right) \cdot S \cdot h = \left(p_0 + \frac{M \cdot g}{S} \right) \cdot \Delta V.$$

Эта работа численно равна площади прямоугольника A23B на рис. 64.

Теперь рабочие, находящиеся на высоте h , могут снять блок с поршня. Однако прежде необходимо закрепить поршень креплениями (см. состояние 3' на рис. 65), чтобы сила давления находящегося под ним газа не вытолкнула его из цилиндра.

Чтобы поднять следующий блок, необходимо вернуть поршень в исходное состояние. Вначале надо уравнять давления по обе стороны поршня. Для этого приведём систему в контакт с менее нагретым телом (холодильником) так, как это показано на рис. 65 (процесс 3–4). В процессе передачи холодильнику количества теплоты Q_{34} давление газа уменьшится до значения p_0 , равного внешнему давлению. Этот процесс будет изохорным ос-

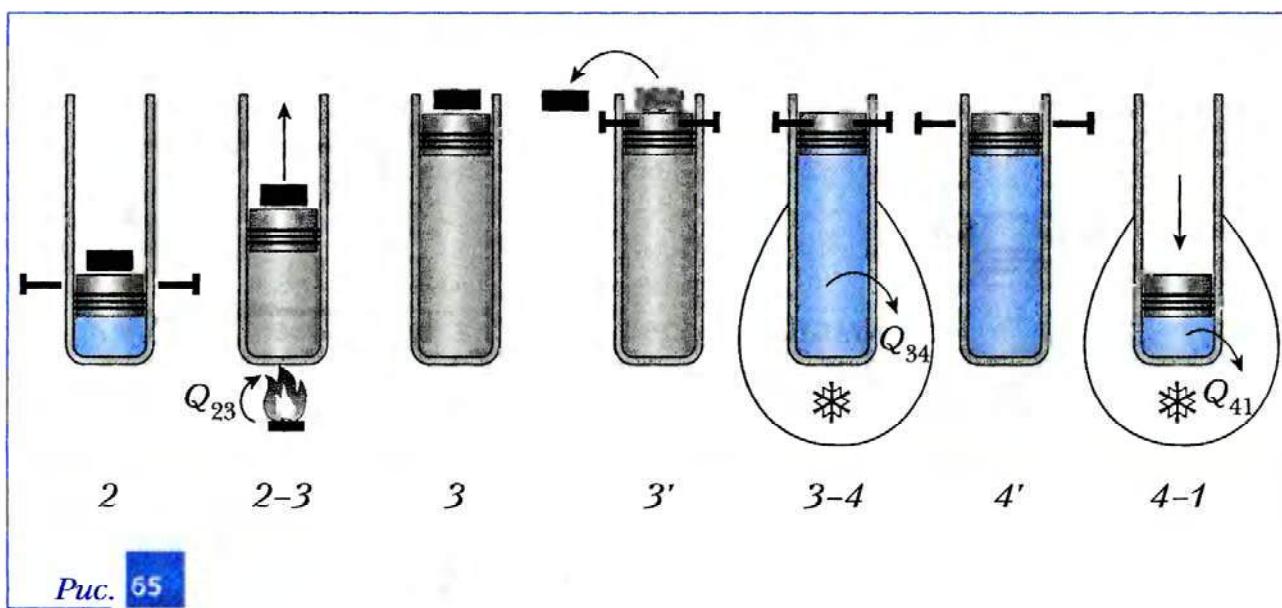


Рис. 65

тыванием. На рис. 64 ему соответствует отрезок 3-4. Работа газа в этом процессе равна нулю.

Теперь, когда давления по обе стороны поршня сравнялись, поршень можно освободить от креплений (состояние 4' на рис. 65).

Вернём поршень в исходное состояние. Для этого опять приведём цилиндр в контакт с холодильником. В результате передачи холодильнику количества теплоты Q_{41} происходит процесс изобарного сжатия до начального объёма V_0 (процесс 4-1 на рис. 65). На рис. 64 этому процессу соответствует отрезок 4-1.

В процессе 4-1 объём газа уменьшается:

$$\Delta V = V_0 - (V_0 + h \cdot S) = -h \cdot S < 0.$$

Поэтому работа газа, равная произведению его давления p_0 на изменение объёма ΔV , будет отрицательна: $A_{41} = -p_0 \cdot h \cdot S$. Отрицательная работа газа в процессе 4-1 по модулю численно равна площади прямоугольника A14B на рис. 64.

На этом цикл работы теплового двигателя завершается, и можно поднимать следующий блок.

Рассчитаем работу A , совершённую газом за весь цикл. Она равна сумме всех работ газа за все четыре такта. Поскольку $A_{12} = A_{34} = 0$, то

$$A = A_{23} + A_{41} = \left(p_0 + \frac{M \cdot g}{S} \right) \cdot S \cdot h - p_0 \cdot S \cdot h = \frac{M \cdot g}{S} \cdot S \cdot h = M \cdot g \cdot h.$$

Таким образом, полезная работа газа (рабочего вещества теплового двигателя) за один цикл в точности равна увеличению потенциальной энергии взаимодействия с Землёй каменного блока массой M при его подъёме на высоту h .

КПД теплового двигателя равен отношению полезной работы A к полученному от нагревателя за цикл работы двигателя количеству теплоты Q_n :

$$\eta = \frac{A}{Q_n} = \frac{A}{Q_{12} + Q_{23}}.$$

Сравним КПД рассмотренного двигателя с единицей. Вы знаете (см. § 26), что при изобарном расширении полученное газом количество теплоты всегда больше работы, совершаемой газом. Поэтому $Q_{23} > A_{23}$. Поскольку работа A_{23} численно равна площади прямоугольника A23B, а работа A численно равна площади прямоугольника 1234, то $A_{23} > A$. Поэтому

$$Q_n = Q_{12} + Q_{23} > Q_{23} > A_{23} > A.$$

Следовательно,

$$\eta = \frac{A}{Q_n} = \frac{A}{Q_{12} + Q_{23}} < 1.$$

ТЕПЛОВЫЕ МАШИНЫ

Все известные тепловые машины можно разделить на два класса: тепловые двигатели и холодильные машины.

Тепловые двигатели — это устройства, превращающие внутреннюю энергию топлива в механическую.

Холодильные машины предназначены для охлаждения (т. е. уменьшения температуры) тел.

Цикл работы двигателей внутреннего сгорания состоит из четырёх тактов: всасывание, сжатие, рабочий ход и выпуск. Только во время рабочего хода внутренняя энергия сильно разогретого рабочего вещества частично переходит в механическую энергию. Во время трёх остальных тактов механическую работу над рабочим веществом совершают поршни или компрессор двигателей.

В поршневых двигателях все такты осуществляются в одном и том же месте (цилиндре), но в разные моменты времени. В газотурбинных двигателях эти такты происходят одновременно, но в разных частях двигателя.

Коэффициентом полезного действия (КПД) двигателя называют отношение совершённой двигателем полезной работы A к полученному от нагревателя рабочим веществом количеству теплоты Q_n за цикл работы двигателя. В идеальном случае он равен:

$$\eta = \frac{A}{Q_n} = \frac{Q_n - Q_x}{Q_n}.$$

Максимальный КПД любого теплового двигателя вне зависимости от используемого в этом двигателе рабочего вещества не может превышать величину:

$$\eta_{\max} = \frac{T_n - T_x}{T_n},$$

где T_n — температура нагревателя, а T_x — температура холодильника (теплоприёмника) по шкале температур Кельвина.

КПД любого теплового двигателя всегда меньше единицы.

Глава

6

Электрические явления

Понятия *электричество* и *электрические явления* вам, конечно же, знакомы. В повседневной жизни к электричеству относят всё, что связано с электрической энергией и её использованием, начиная от батареек для часов, электрического освещения, бытовой электротехники до электродвигателей, линий электропередачи и электростанций. Но всё это «электричество» появилось много позже того, как люди стали задумываться над такими природными явлениями, как молнии, свечение на концах высоких предметов (шпилей, корабельных мачт) во время грозы, взаимодействие между предметами после того, как некоторые из них подвергались трению.

Исследование этих явлений началось в XVIII в. с изучения атмосферного электричества Бенджамином Франклином (1706–1790) и экспериментов по взаимодействию электрически заряженных тел, выполненных Шарлем Кулоном (1736–1806). Оказалось, что в основе очень многих явлений природы лежат именно электрические взаимодействия.

Начиная с этой главы мы приступаем к их изучению. Рассмотрим прежде всего наиболее простой случай – электрическое взаимодействие тел, неподвижных относительно инерциальной системы отсчёта.

§ 33

Электризация тел.

Два вида электрических зарядов

Нарвите маленькие кусочки газетной бумаги и насыпьте их на стол. Возьмите расчёску и проведите ею несколько раз по волосам. Теперь поднесите расчёску к этим кусочкам. Вы увидите, как они притянутся к расчёске (рис. 66).

Подобные явления были известны с давних времён. Ещё в Древней Греции установили, что после натирания янтаря о шерсть он может притяги-

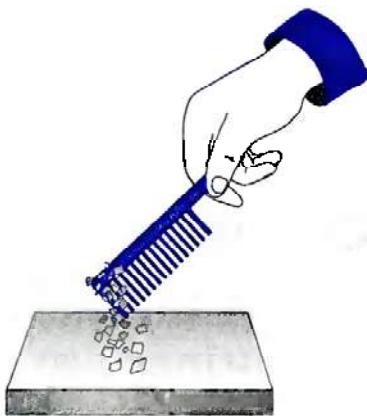


Рис. 66 Пластмассовая расчёска, потёртая о волосы, притягивает к себе мелкие обрывки бумаги

вать к себе различные мелкие частицы. Позднее такие явления в физике стали называть **электрическими** (от греч. *электрон* – янтарь).

! Тело, которое после натирания приобретает способность притягивать другие тела, называют **наэлектризованным**. Про наэлектризованное тело часто говорят, что оно приобрело **электрический заряд**. Силы, с которыми тело после электризации начинает взаимодействовать с другими телами, называют **электрическими силами**.

Исследуем подробнее взаимодействие наэлектризованных тел.

Во-первых, отметим, что способностью к электризации при натирании друг о друга обладают разные вещества. Например, эbonит (каучук с примесью серы) электризуется при трении о мех, а стекло – при трении о шёлк. Причём электризуются в результате такого трения *оба* трущихся тела: эbonит и мех или стекло и шёлк.

Рассмотрим прежде всего взаимодействие двух одинаковых натёртых мехом эbonитовых палочек. Опыт показывает, что при сближении они отталкиваются друг от друга (рис. 67). Отметим, что с увеличением расстояния сила отталкивания между ними ослабевает. Так же ведут себя и две одинаковые натёртые шёлком стеклянные палочки – они также отталкиваются друг от друга. Результаты этих опытов позволяют нам предположить, что электрические заряды, *полученные одинаковым образом*, т. е. заря-

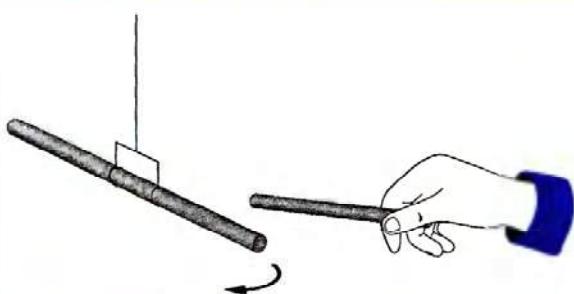


Рис. 67 Наэлектризованные эbonитовые палочки отталкиваются

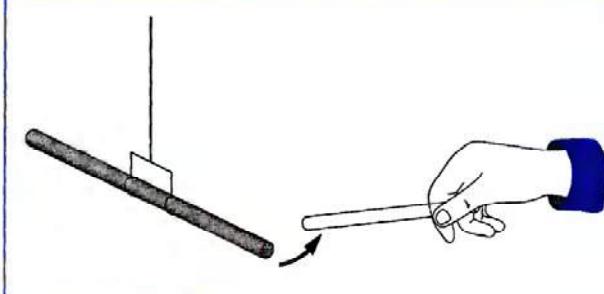


Рис. 68 Наэлектризованные эbonитовая и стеклянная палочки притягиваются

ды одного вида, отталкиваются друг от друга. Это предположение подтверждается экспериментами с любыми другими парами тел, которые наэлектризованы одинаковым образом.

Теперь исследуем взаимодействие наэлектризованных тел, получивших заряд *разным образом*. Для этого поднесём натёртую шёлком стеклянную палочку к натёртой мехом эbonитовой палочке. Мы увидим, что такие палочки будут притягиваться друг к другу (рис. 68).

Следовательно, заряды эbonитовой и стеклянной палочек, наэлектризованных по-разному, взаимодействуют иначе. На основании этого можно сделать вывод, что существуют заряды разных видов.

Сколько же всего в природе видов электрического заряда?

Многочисленные эксперименты показывают, что существуют заряды *только двух видов*.



Тела, заряженные одинаковыми видами заряда, отталкиваются друг от друга, а тела, заряженные разноимённо, притягиваются друг к другу.

Таким образом, у эbonитовой палочки, потёртой о мех, заряд иного рода, чем у стеклянной палочки, потёртой о шёлк. Этим двум видам зарядов присвоены условные знаки.

Электрический заряд, который получает стеклянная палочка при трении о шёлк, называют положительным и обозначают знаком «+».

Напротив, электрический заряд, который получает эbonитовая палочка при трении о мех, называют отрицательным и обозначают знаком «-».

Как же определить знак заряда какого-либо наэлектризованного тела? Очевидно, для этого надо поднести к телу с зарядом *известного знака*, например к положительно заряженной стеклянной палочке. Если тело и палочка будут притягиваться, то их заряды противоположны по знаку. Следовательно, такое тело заряжено отрицательно. Напротив, если тело и положительно заряженная стеклянная палочка будут отталкиваться друг от друга, то их заряды одного знака, и, следовательно, тело заряжено положительно.

Понятно, что для определения знака заряда заряженное тело можно поднести и к носителю отрицательного заряда, например к эbonитовой палочке, потёртой о мех. Если при этом будет наблюдаться их притяжение, то неизвестный заряд является положительным. Напротив, если они отталкиваются, то знаки их зарядов совпадают.

! Чтобы определить знак заряда наэлектризованного тела, его нужно поднести к телу с зарядом известного знака.

При проведении экспериментов с наэлектризованными телами вы наверняка заметили, что сила их взаимодействия зависит от того, как происходил процесс электризации. Например, если одной пластмассовой расчёской провести по волосам один раз, а другой такой же расчёской – несколько раз и затем поднести эти наэлектризованные расчёски к мелким кусочкам бумаги, то ко второй расчёске кусочки бумаги будут притягиваться сильнее, чем к первой. Следовательно, вторая расчёска будет более наэлектризована. Её электрический заряд будет по модулю больше, чем заряд первой расчёски.

Таким образом, электрические заряды разных тел могут различаться не только знаком, но и величиной.

Понятно, что чем сильнее наэлектризовано тело, тем большую способность к электрическим взаимодействиям оно проявляет. Для того чтобы охарактеризовать эту способность тела, вводят физическую величину – **электрический заряд тела**.

Электрический заряд – это физическая величина, характеризующая способность тела к электрическим взаимодействиям.

Электрический заряд обозначают буквой q (или Q).

Сила взаимодействия наэлектризованных тел зависит и от расстояния между ними. Чем меньше расстояние между телами, тем больше сила их взаимодействия. С увеличением расстояния эта сила уменьшается.

В заключение отметим, что так как при электризации трением электрический заряд приобретают оба трещихся тела, то можно легко убедиться в том, что знаки их зарядов различны.

! При электризации трением друг о друга тела приобретают заряды разного знака.

Итоги

Наэлектризованным называют тело, которое после натирания приобрело способность притягивать другие тела. Про такое тело говорят, что оно приобрело электрический заряд. Силы, с которыми тело после электризации начинает взаимодействовать с другими телами, называют **электрическими силами**.

Существуют только два вида зарядов. Их условно называют положительными и отрицательными.

Электрический заряд, который получает стеклянная палочка при трении о шёлк, называют положительным и обозначают знаком «+».

Электрический заряд, который получает эбонитовая палочка при трении о мех, называют отрицательным и обозначают знаком «-».

Тела, заряженные зарядами одного знака, отталкиваются друг от друга, а тела, заряженные разноимённо, — притягиваются.

Для того чтобы определить знак заряда какого-либо наэлектризованного тела, его надо поднести к телу с зарядом известного знака.

Сила взаимодействия наэлектризованных тел увеличивается при увеличении модулей зарядов этих тел и убывает с увеличением расстояния между ними.

Электрический заряд — это физическая величина, характеризующая способность тела к электрическим взаимодействиям.

При электризации трением оба трещихся тела приобретают заряды. Причём эти заряды имеют противоположные знаки.

Вопросы

- 1 Какие тела называют наэлектризованными? Приведите примеры наэлектризованных тел.
- 2 Какие силы называют электрическими?
- 3 Сколько существует видов зарядов? Какие эксперименты доказывают, что существуют заряды разных видов?
- 4 Как взаимодействуют тела, имеющие заряды одного знака?
- 5 Заряд какого наэлектризованного тела принят за положительный, а какого — за отрицательный?
- 6 Что называют электрическим зарядом?

Упражнения

-  1 Наэлектризуйте тело (работу выполняет одна часть группы). Запланируйте и проведите эксперимент по определению знака

- заряда наэлектризованного тела (работу выполняет другая часть группы).
- 2 Наэлектризуйте трением друг о друга два тела. С помощью эксперимента докажите, что тела имеют заряды разного знака.
- 3 Эбонитовую палочку натёрли о мех, а стеклянную — о шёлк. Выскажите гипотезу, будут ли взаимодействовать и как: а) мех и шёлк; б) мех и стеклянная палочка; в) шёлк и эбонитовая палочка. Проверьте гипотезу экспериментально.

§ 34 Строение атомов

На протяжении столетий учёные не могли дать объяснения наблюдаемым электрическим явлениям. Это стало возможно только после открытия строения атомов.

Напомним, что атом — это мельчайшая структурная единица химического элемента. Молекула любого вещества состоит из атомов. Атомы же всех веществ, хотя и отличаются друг от друга, состоят из *протонов, нейтронов и электронов*.

Как же устроены атомы?

Оказывается, атомы всех веществ устроены похожим образом. Простейшая модель атома имеет следующий вид.

В центре любого атома расположено его ядро. Оно состоит из положительно заряженных частиц — *протонов* и нейтральных (не имеющих заряда) частиц — *нейтронов*. Поэтому ядро любого атома заряжено положительно, и массы протона и нейтрона приблизительно равны.

Вокруг положительно заряженного ядра, как планеты вокруг Солнца, движутся отрицательно заряженные частицы — *электроны*. Такое движение электронов обусловлено взаимодействием с положительно заряженным ядром.

Масса электрона примерно в 1840 раз меньше массы протона. *Заряд электрона отрицателен и равен по модулю заряду протона.*

Число электронов, движущихся вокруг ядра атома, равно числу протонов в этом ядре. Поэтому суммарный отрицательный заряд всех электронов атома по модулю равен положительному заряду его ядра.

Следовательно, общий заряд атома равен нулю, т. е. *атом в целом электрически нейтрален*.

На рис. 69 приведены модели атомов водорода и гелия. Положительно заряженные протоны в ядре обозначены знаком «+», а отрицательно заряженные электроны — знаком «—». Ядро атома водорода состоит из одного протона. Вокруг него движется один электрон. Ядро атома гелия состоит из двух протонов и двух нейтронов, а сам атом имеет два электрона.

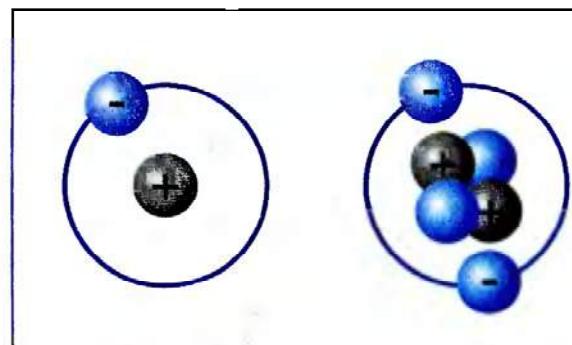


Рис. 69 Модели атомов водорода и гелия

Число протонов, содержащихся в ядре атома, определяет заряд ядра и химические свойства вещества. Ядра атомов одного химического элемента содержат **одинаковое количество протонов**.

Например, ядро каждого атома азота содержит 7 протонов, кислорода — 8, урана — 92.

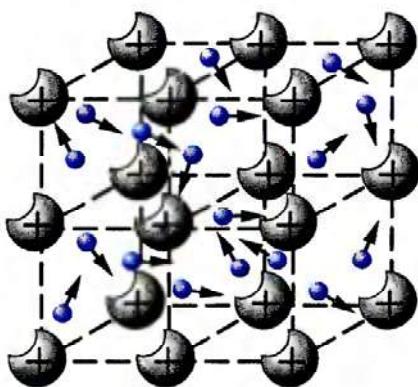
Отметим особо, что заряд частицы (протона, электрона) является одной из её характеристик, подобно массе, и поэтому неотделим от самой частицы. Таким образом, носителями электрического заряда являются частицы.

Наиболее удалённые от ядра атома электроны, которые движутся по крайним орбитам, притягиваются к ядру слабее остальных. Поэтому при определённых условиях они могут покинуть атом. Такой атом перестаёт быть электрически нейтральным. Его суммарный заряд становится положительным. *Атом, потерявший один или несколько электронов, называют положительным ионом.*

Если же к нейтральному атому присоединяется лишний электрон, то суммарный заряд такого атома становится отрицательным. *Атом, присоединивший один или несколько электронов, называют отрицательным ионом.*

Способность атомов отдавать или присоединять к себе электроны зависит от их строения. Существуют вещества, атомы которых имеют сильно удалённые и слабо удерживаемые ядрами электроны. Такие атомы легко расстаются с этими электронами.

Число нейтронов в ядре данного химического элемента может быть различным. Атомы одного и того же химического элемента, отличающиеся количеством нейтронов, называют **изотопами** этого элемента.



Rис. 70 В узлах кристаллической решётки металла расположены положительно заряженные ионы, в пространстве между ними движутся свободные электроны

заряженные ионы. В отличие от ионов металлов такие ионы могут свободно перемещаться по всему объёму раствора.

Носители заряда (свободные электроны в металлах, ионы в растворах), которые могут свободно перемещаться по веществу, называют свободными носителями заряда.

Тела, изготовленные из веществ, в которых имеются свободные носители заряда, называют проводниками.

Проводниками являются все металлы, водные растворы солей и кислот и некоторые другие вещества.

Существуют вещества, в которых электроны прочно удерживаются в своих атомах. Поэтому в них нет свободных носителей заряда.

Вещества, в которых нет свободных носителей заряда, называют диэлектриками.

К диэлектрикам относятся все газы, резина, эbonит, пластмасса и др. Тела, изготовленные из веществ-диэлектриков, иногда называют изоляторами.

Существуют также вещества, строение которых таково, что по своим свойствам они занимают промежуточное положение между проводящими веществами и диэлектриками. Их называют полупроводниками. Об этих веществах мы поговорим позже.

! В некоторых веществах отдельные электроны покидают своё место в атоме и свободно движутся по всему объёму вещества, подобно молекулам газа. Такие электроны называют **свободными**.

Большое количество свободных электронов содержится в металлах (около 10^{23} в 1 см³). При этом образовавшиеся в результате потери электронов положительные ионы остаются в узлах кристаллической решётки (рис. 70).

Иная картина наблюдается в растворах и расплавах некоторых солей, щелочей и кислот, где в результате распада молекул образуются положительно и отрицательно

Итоги

Атомы всех веществ состоят из протонов, нейтронов и электронов.

Ядро состоит из положительно заряженных частиц — протонов и нейтральных (не имеющих заряда) частиц — нейтронов. Ядро любого атома заряжено положительно.

Вокруг положительно заряженного ядра движутся отрицательно заряженные частицы — электроны. Заряд электрона равен по модулю заряду протона.

Число движущихся вокруг ядра электронов равно числу протонов в этом ядре. Поэтому общий заряд атома равен нулю и атом в целом электрически нейтрален.

Число протонов, содержащихся в ядре атома (т. е. заряд его ядра), определяет химические свойства вещества.

Атом, потерявший один или несколько электронов, называют положительным ионом.

Атом, присоединивший один или несколько электронов, называют отрицательным ионом.

Носители заряда (свободные электроны в металлах, ионы в растворах), которые могут свободно перемещаться по веществу, называют свободными носителями заряда.

Тела, изготовленные из веществ, в которых имеются свободные носители заряда, называют проводниками.

Вещества, в которых нет свободных носителей заряда, называют диэлектриками. Изготовленные из таких веществ тела иногда называют изоляторами.

Вопросы

- 1** Что такое атом?
- 2** Какова простейшая модель атома? Какие частицы входят в состав атома?
- 3** Заряды какого знака имеют частицы, входящие в состав атома?
- 4** Чему равен общий заряд атома? Почему?
- 5** Почему может изменяться число электронов в атоме?
- 6** Какой атом называют положительным (отрицательным) ионом?

- 7 Какие электроны называют свободными?
- 8 Что называют свободными носителями заряда? Какие свободные носители заряда вы знаете?
- 9 Какие тела называют проводниками? Какие вещества называют диэлектриками?
- 10 Является ли человеческое тело проводником? Ответ поясните.

Упражнения

- 1 Приведите примеры веществ, которые являются: а) проводниками; б) диэлектриками.
- 2 Атом углерода содержит 12 электронов. Сколько протонов содержит его ядро?
- 3 Ядро изотопа кислорода содержит 8 протонов и 10 нейтронов. Сколько электронов имеет атом этого изотопа?

§ 35

Объяснение электрических явлений.

Закон сохранения электрического заряда

Теперь, когда мы знаем, что атом любого вещества содержит положительно и отрицательно заряженные частицы — протоны и электроны, мы можем объяснить явление электризации тел.

В обычном, не наэлектризованном, состоянии любое тело содержит одинаковое количество протонов и электронов. Поэтому суммарный заряд тела в целом равен нулю и оно электрически нейтрально.

Если в силу каких-либо причин часть электронов покидает тело, то количество протонов в этом теле будет превышать количество оставшихся в нём электронов. В результате тело в целом будет иметь положительный заряд. При этом чем больше электронов покинет тело, тем большим будет его заряд.

Напротив, если тело в результате какого-то процесса приобретает электроны, то их общее число становится большим, чем число протонов. В результате тело в целом будет иметь отрицательный заряд. Ясно, что чем большее количество электронов приобретёт тело, тем большим по модулю будет его отрицательный заряд.

- 1 Электрически нейтральное тело приобретает электрический заряд (электризуется), когда оно получает или теряет электроны.

Именно таким образом происходит электризация тел при их трении друг о друга.

В стекле притяжение электронов к ядрам атомов в среднем меньше, чем в шёлке. Поэтому, когда мы трём стеклянную палочку о шёлк, часть электронов со стекла переходит на шёлк. (Отметим, что при этом происходит и обратный процесс — некоторые электроны с шёлка переходят на стекло. Однако их число намного меньше, так как они притягиваются к ядрам своих атомов с большими силами.) В результате шёлк приобретает отрицательный заряд, а стеклянная палочка — положительный. В этом легко убедиться, исследовав их взаимодействие с телом, знак заряда которого известен. Аналогичным образом происходит электризация трением и других тел.

Понятно, что при электризации трением двух тел отрицательный заряд, полученный первым телом, по модулю равен положительному заряду второго тела. Действительно, ведь количество дополнительных электронов, которые приобрело первое тело, равно их количеству, отданному вторым телом.

! Следовательно, суммарный заряд двух тел при электризации остаётся неизменным.

Этот вывод является частным случаем одного из фундаментальных законов природы — *закона сохранения электрического заряда*.

Алгебраическая сумма электрических зарядов системы тел остаётся неизменной, если в неё не приходят заряды извне и из неё не уходят заряды:

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

где $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ — электрические заряды всех тел системы.

Смысл этого закона сводится к тому, что ни в какой системе тел невозможно изменение соотношения числа частиц, имеющих положительные и отрицательные заряды, если в неё не приходят заряженные частицы и из неё не уходят заряженные частицы.

При изучении физики в старших классах вы узнаете, что в природе возможны процессы, в которых образуются или исчезают частицы, имеющие электрические заряды. В таких процессах заряженные частицы всегда образуются или исчезают парами.

! Вместе с положительно заряженной частицей всегда образуется (исчезает) частица с таким же по модулю, но отрицательным зарядом.

Из закона сохранения заряда следует, что если какое-либо тело (или система тел) имеет избыток или недостаток электронов, то заряд этого тела (или системы тел) будет оставаться неизменным, пока оно не отдаст или не получит некоторое количество электронов или ионов.

Все тела (даже электрически нейтральные) состоят из заряженных частиц, входящих в состав их атомов. Это позволяет объяснить, почему наэлектризованные тела притягивают к себе ненаэлектризованные.

Вспомним эксперимент с наэлектризованной о волосы расчёской и мелкими обрывками бумаги. Бумага является диэлектриком. Поэтому в ней отсутствуют свободные носители заряда. Однако когда мы подносим к ней наэлектризованное тело (расчёску), то все заряды, имеющиеся в бумаге, — положительно заряженные ядра атомов и электроны — под действием наэлектризованного тела немножко смещаются в пределах атомов. Заряды, имеющие тот же знак, что и расчёска, слегка отдаляются под действием сил отталкивания. Заряды же противоположного знака смещаются в сторону расчёски под действием сил притяжения. Эти смещения чрезвычайно малы. Однако количество атомов огромно. Поэтому на ближней к расчёске стороне бумаги образуется достаточно большой притягивающийся к расчёске заряд. Знак этого заряда противоположен знаку заряда расчёски. На дальней от расчёски стороне бумаги образуется отталкивающийся от неё заряд. Знак этого заряда совпадает со знаком заряда расчёски.

Притягивающийся к расчёске заряд оказывается ближе к ней, чем отталкивающийся. Поэтому сила притяжения ближнего к расчёске и разноимённого с ней заряда будет больше, чем сила отталкивания дальнего одноимённого заряда. В результате бумага, несмотря на то что её суммарный заряд равен нулю, притягивается к расчёске.



Явление образования зарядов на границах диэлектрика под действием электрических сил со стороны поднесённого к нему наэлектризованного тела называют **поляризацией диэлектрика**. Возникающие при этом на границах диэлектрика заряды называют **поляризационными**. Иногда эти заряды называют **индукционными** (**наведёнными**).

Заменим кусочки бумаги небольшим кусочком электрически нейтральной металлической фольги. Легко убедиться в том, что фольга притягивается к наэлектризованному телу (расчёске) с большей силой, чем бумага. Это объясняется тем, что фольга, в отличие от бумаги, является проводником. Механизм притяжения незаряженных проводников к заряженным телам отличается от уже рассмотренного. В проводниках имеются свободные носители зарядов. В фольге это свободные электроны. Под действием сил со стороны поднесённого наэлектризованного тела они начинают двигать-

ся. Если расчёска заряжена, к примеру, положительно, то достаточно большая часть свободных электронов фольги сдвинется в сторону ближней к расчёске поверхности фольги. В результате на этой поверхности образуется избыточный отрицательный заряд, а на противоположной поверхности — положительный, так как заряд оставшихся в узлах кристаллической решётки положительных ионов не будет скомпенсирован. Избыточный отрицательный заряд окажется ближе к расчёске, чем отталкивающийся от неё положительный заряд. Поэтому фольга притягивается к расчёске.

Свободные электроны в металлах, в отличие от зарядов в диэлектриках, могут смещаться на любые расстояния в пределах проводника. Избыточные заряды, образующиеся в подобных экспериментах на краях фольги, много больше, чем заряды на краях бумаги (диэлектрика). Поэтому и сила притяжения к наэлектризованному телу у фольги много больше, чем у бумаги.

! Явление образования зарядов на границах проводника под действием электрических сил со стороны поднесённого наэлектризованного тела называют электростатической индукцией проводника. Заряды, которые возникают при этом на границах проводника, называют наведёнными.

Опыты с электризацией тел показывают, что, коснувшись расчёски, фольга оттолкнётся от неё. Это означает, что *фольга при касании приобретает заряд*, причём знаки зарядов обоих тел становятся одинаковыми. **Как это объяснить?**

При касании часть свободных электронов фольги переходит на положительно заряженную расчёску. В результате электрически нейтральная фольга приобретает положительный заряд, т. е. становится наэлектризованной.

Таким образом, электризация тела возможна в результате его касания другим заряженным телом.

Итоги

Если часть электронов покинет незаряженное тело, то количество протонов в нём будет превышать количество оставшихся электронов. Такое тело будет иметь положительный заряд.

Если незаряженное тело приобретёт электроны, то их общее число в теле станет больше числа протонов. Такое тело будет иметь отрицательный заряд.

Нейтральное тело приобретает электрический заряд (электризуется), когда оно получает или теряет электроны.

Чем больше электронов получает или теряет тело при электризации, тем больший *по модулю* заряд оно приобретает.

Суммарный заряд двух тел при электризации остаётся неизменным.

Закон сохранения электрического заряда.

Алгебраическая сумма электрических зарядов системы тел остаётся неизменной, если в неё не поступают заряды извне и из неё не уходят заряды.

$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$, где $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ – электрические заряды всех тел системы.

Явление образования зарядов на границах диэлектрика под действием электрических сил со стороны наэлектризованного тела называют *поляризацией диэлектрика*, а возникающие при этом на его границах заряды – *поляризационными*.

Вопросы

- 1 Какой заряд будет иметь тело, если часть электронов покинет его? Если оно, наоборот, приобретёт электроны?
- 2 Как соотносятся знаки и модули зарядов двух ранее незаряженных тел при их электризации трением друг о друга?
- 3 Сформулируйте закон сохранения электрического заряда.
- 4 Какое явление называют поляризацией диэлектрика? Изменяется ли при поляризации диэлектрика его общий заряд?
- 5 Почему изолятор (тело из диэлектрика), имеющий в целом заряд, равный нулю, притягивается к наэлектризованному телу?
- 6 Чем отличаются процессы поляризации диэлектрика и электростатической индукции проводника?
- 7 В каком из веществ (эбоните или мехе) электроны сильнее притягиваются к ядрам атомов? Ответ обоснуйте.

Упражнение



Проведите эксперименты по электризации тел, описанные в § 33 (см. рис. 66–68). Объясните наблюдаемые явления, используя сведения о строении атомов и образовании наведённых и поляризационных зарядов.

§ 36 Электроскоп

На явлении электризации проводников основано действие прибора, который называют **электроскопом** (рис. 71, 72). Электроскоп состоит из диэлектрического корпуса, в который сверху через пластмассовую пробку (изолятор) вставлен металлический стержень с подвешенными к нему лёгкими металлическими листочками. Спереди и сзади корпус закрыт стёклами.

Если к верхней части металлического стержня электроскопа поднести заряженное тело (рис. 71), то в этом стержне, как и в случае с фольгой, произойдёт перераспределение свободных электронов. На верхней части стержня образуется наведённый избыточный заряд, знак которого противоположен знаку заряда поднесённого тела. При этом на лепестках электроскопа появится заряд, знак которого, напротив, будет совпадать со знаком заряда поднесённого тела. В результате лепестки оттолкнутся друг от друга и разойдутся в разные стороны. Ясно, что чем больший заряд приобретут лепестки, тем сильнее, на больший угол, они разойдутся. Если теперь убрать заряженное тело, то лепестки вернутся в исходное положение, поскольку стержень с лепестками *не был заряжен*.

Если же заряженным телом коснуться стержня электроскопа, то, как и в случае с фольгой, часть заряда с этого тела перейдёт на стержень электроскопа. В результате заряженные лепестки разойдутся. Если после этого убрать заряженное тело, то лепестки уже не вернутся в исходное положение, так как стержень с лепестками будет заряжен. Для того чтобы лепе-

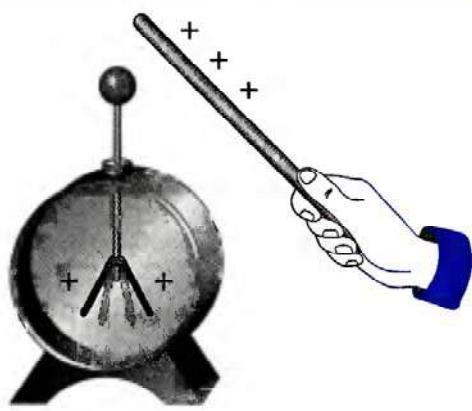


Рис. 71 Лепестки незаряженного электроскопа расходятся при поднесении к нему заряженного тела

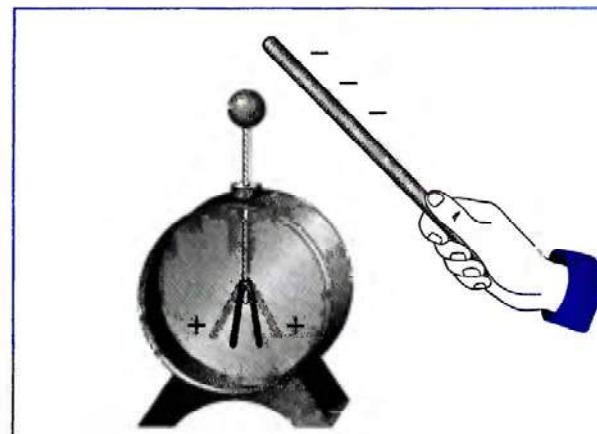
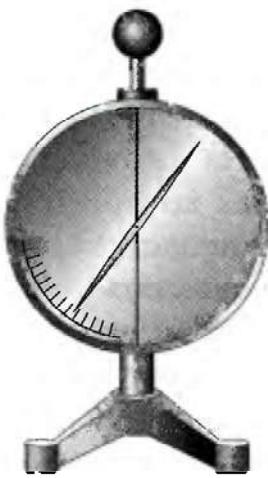


Рис. 72 Лепестки положительно заряженного электроскопа сходятся при поднесении тела, заряженного противоположным знаком

стки электроскопа вновь начали сходиться, можно поднести к стержню электроскопа тело, имеющее заряд противоположного знака (рис. 72).

! По углу расхождения лепестков электроскопа можно судить о модуле их заряда.

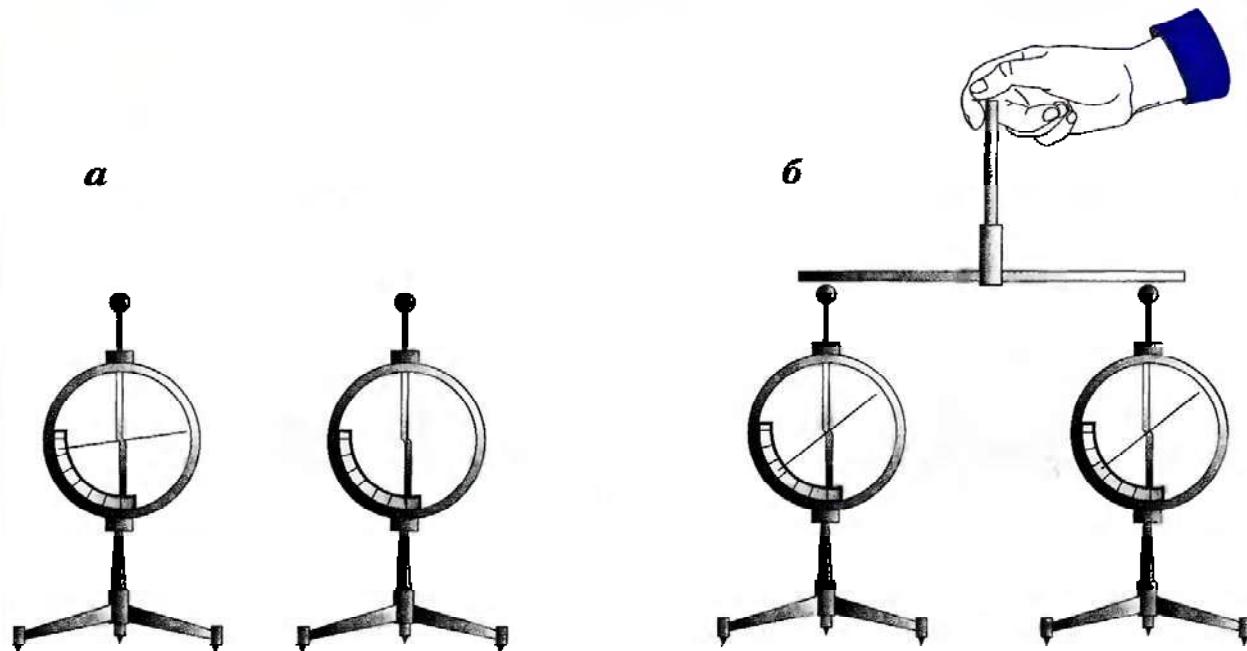


Rис. 73 Электрометр

Сделать заключение о заряде тех или иных тел можно с помощью другого прибора — **электрометра**. В отличие от электроскопа в нём вместо лепестков используется металлическая стрелка, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси (рис. 73).

В отсутствие заряда стрелка под действием силы тяжести принимает вертикальное положение. Если же электрометр заряжен, то стрелка, отталкиваясь от стержня, отклоняется. Чем больше заряд электрометра, тем больше будет угол отклонения стрелки (рис. 74, а). Для оценки заряда электрометра по углу отклонения стрелки используется специальная шкала.

Проведём следующий эксперимент. Соединим проводником заряженный электрометр, изображённый на рис. 74, а, с точно таким же,



Rис. 74 Опыт, демонстрирующий делимость электрического заряда

но не заряженным прибором (рис. 74, б). Мы увидим, что стрелки обоих электрометров установятся в одинаковом положении на шкалах. Стрелка первоначально заряженного электрометра опустится вниз, а стрелка второго электрометра отклонится вверх. Это означает, что первоначальный заряд разделился поровну между двумя приборами.

А как разделяются заряды при соединении двух проводников, если один из них существенно больше другого? Эксперимент показывает, что чем больше один из проводников, тем больший заряд оказывается на нём. На этом свойстве проводников основано их разряжение при соединении с землёй — *заземление*.

Заземление используют для снятия нежелательных зарядов с различных устройств и тел. Например, при перекачивании топлива и его транспортировке в результате трения образуются электрические заряды достаточно большой величины. Они способны вызвать электрический пробой в воздухе (искру) и взрыв. Для снятия образующихся зарядов перекачивающие насосы соединяют с землёй. Для этого же к металлическому кузову бензовоза прикрепляют металлическую цепочку, которая касается дороги.

Итоги

Для оценки заряда наэлектризованного тела можно использовать *электроскопы* и *электрометры*.

При соприкосновении двух одинаковых проводников, заряженного и не заряженного, заряд между ними распределяется поровну. Если же размеры первого проводника больше второго, то заряд первого проводника оказывается большим.

Заземление (соединение проводника с землёй) используют для снятия заряда с проводника.

Вопросы

1. Почему при приближении заряженного тела к стержню незаряженного электроскопа его лепестки расходятся?
2. Как определить знак заряда наэлектризованного тела при помощи положительно заряженного электроскопа?
- *3. Можно ли зарядить проводник, соединив его с землёй? Если да, то как?

Упражнение



Сконструируйте и изготовьте электроскоп. Проведите эксперименты, описанные в параграфе (см. рис. 71, 72). Объясните наблюдаемые явления.

§ 37

Закон Кулона

Теперь, когда вы познакомились с механизмом электризации тел и особенностями их взаимодействия между собой, перейдём к количественному описанию этих явлений.

Рассмотрим случай, когда взаимодействующие заряженные тела имеют достаточно малые размеры по сравнению с расстоянием между ними. **К**

В этом случае тела можно считать точечными, т. е. размерами этих тел пренебрегают. Если такие тела заряжены, их называют *точечными зарядами*.

Заряженные точечные тела называют точечными зарядами.

Напомним, что электрический заряд принято обозначать буквой q (или Q). Единицей заряда в СИ является *кулон* (Кл). Название единицы установлено в честь французского физика Шарля Кулона, открывшего в 1785 г. опытным путём закон взаимодействия неподвижных точечных зарядов.

К настоящему времени известно, что наименьшими по модулю электрическими зарядами обладают протон и электрон. Заряды всех протонов одинаковы и равны минимально встречающемуся в природе: $q_p \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряды всех электронов также одинаковы: $q_e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Таким образом, заряд электрона равен по модулю заряду протона.



! Все остальные известные к настоящему времени частицы имеют заряды, равные или в целое число раз превышающие по модулю заряд электрона. Поэтому модуль заряда электрона часто называют *элементарным зарядом*.

В своих экспериментах Кулон использовал крутильные весы (рис. 75). В этих весах на тонкой упругой проволочке подвешена горизонтально расположенная стеклянная палочка. На противоположных концах этой палочки



К Из-за явления перераспределения заряда на телах, которые имеют значительные размеры по сравнению с расстоянием между ними, количественное описание электрического взаимодействия таких тел оказывается очень сложным и поэтому в школьном курсе физики не рассматривается.

закреплены маленький металлический шарик *A* и противовес *C*. Ещё один металлический шарик *B*, аналогичный шарику *A*, закреплён неподвижно на стеклянном стержне. Этот стержень крепится на крышке весов и может выниматься.

Если шарикам *A* и *B* сообщить заряды одного знака, то они будут отталкиваться. В результате стеклянная палочка будет поворачиваться, закручивая проволочку. По углу закручивания проволочки можно определить силу отталкивания между заряженными шариками. Измерить установившееся *расстояние* между заряженными шариками позволяет шкала на корпусе весов.

А как измерить заряды? Во времена Кулона не существовало приборов для измерения зарядов тел, не было даже единицы заряда. Кулон нашёл оригинальный выход из этого затруднения. Он воспользовался свойством электрического заряда распределяться поровну между двумя одинаковыми металлическими телами при их касании. Сообщив шарику *A* некоторый заряд q , он привёл его в соприкосновение с электрически нейтральным шариком *B*. В результате заряд распределился между этими шариками поровну — по $\frac{q}{2}$. Измерив силу взаимодействия между заряженными шариками по углу закручивания проволочки, Кулон вынул шарик *B* из установки и снял с него заряд. После этого он вновь ввёл незаряженный шарик *B* в установку и привёл его в соприкосновение с шариком *A*. В результате заряд $\frac{q}{2}$ шарика *A* вновь распределился между шариками поровну (по $\frac{q}{4}$). Продолжая эту процедуру, Кулон исследовал взаимодействие между шариками, имеющими заряды $\frac{q}{8}$, $\frac{q}{16}$ и т. д.

Таким образом, Кулон экспериментально исследовал взаимодействие шариков, заряды которых различались в известное число раз.

Обобщив результаты своих экспериментов, Кулон сформулировал закон взаимодействия точечных зарядов.

Два точечных неподвижных заряда, находящиеся в вакууме, взаимодействуют между собой с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними:

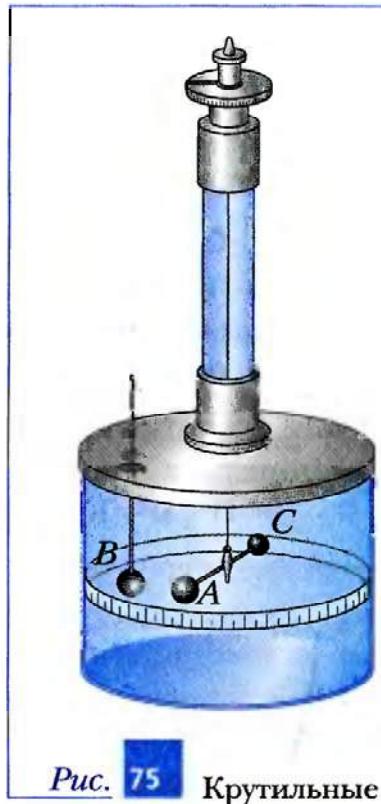


Рис. 75 Крутильные весы Кулона

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

где $|\vec{F}|$ — модуль силы взаимодействия точечных зарядов, $|q_1|$ и $|q_2|$ — модули этих зарядов, r — расстояние между ними, k — коэффициент пропорциональности.

Силы взаимодействия точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды, и являются силами притяжения, если заряды имеют разные знаки, и силами отталкивания, если их знаки одинаковы.

Если в формуле закона Кулона заряды, расстояние между ними и силу измерять в СИ, то значение коэффициента пропорциональности $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$.

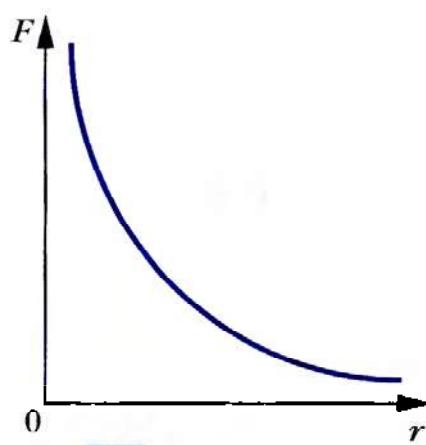


Рис. 76

Приведённое значение коэффициента k соответствует случаю, когда заряженные тела взаимодействуют в вакууме. Если заряды находятся в воздухе, то можно считать, что значение коэффициента k остаётся практически таким же. Однако если заряды расположены в какой-то среде, то электрические силы, действующие на них, будут рассчитываться по-другому. Подробнее об этом вы узнаете в старших классах.

График зависимости модуля силы F взаимодействия двух точечных заряженных тел от расстояния r между ними приведён на рис. 76.

Обратим внимание на то, что в законе Кулона говорится о взаимодействии точечных заряженных тел, которые неподвижны. При этом имеется в виду, что рассматриваемые заряды неподвижны в инерциальной системе отсчёта, связанной с Землёй.

Благодаря исследованиям Кулона стало возможным количественное описание электрических явлений и проведение расчётов.

Задача. Определите модуль силы, с которой взаимодействуют в воздухе два неподвижных точечных заряда $q_1 = q_2 = 1 \text{ Кл}$ на расстоянии $r = 1 \text{ км}$.

Решение.

По закону Кулона модуль силы взаимодействия равен:

$$|\vec{F}| = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1000^2} = 9 \text{ (кН)}.$$

Ответ: 9 кН.

Из решения задачи видно, что сила взаимодействия двух таких зарядов даже при столь большом расстоянии между ними огромна. Следовательно, 1 Кл – это очень большой заряд. В реальных ситуациях мы сталкиваемся с зарядами много меньшими. Поэтому для решения задач полезно вспомнить, как называются приставки, обозначающие уменьшение единицы в 10^6 , 10^9 и 10^{12} раз.

Итоги

Заряженные точечные тела называют точечными зарядами.

Электрическим зарядом тела называют физическую величину, характеризующую способность тела к электрическим взаимодействиям.

Единица заряда в СИ – кулон (Кл).

Наименьшими по модулю электрическими зарядами обладают протон и электрон. Заряд протона: $q_p \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, заряд электрона: $q_e \approx -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Заряды протона и электрона являются одной из их характеристик, подобно массе, и неотделимы от самих частиц. Все остальные известные к настоящему времени частицы имеют заряды, равные или в целое число раз превышающие по модулю заряд электрона. Поэтому модуль заряда электрона часто называют элементарным зарядом.

Закон Кулона.

Два точечных неподвижных заряда, находящиеся в вакуме, взаимодействуют между собой с силой, модуль которой прямо пропорционален произведению модулей этих зарядов и обратно пропорционален квадрату расстояния между ними:

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

где $|\vec{F}|$ – модуль силы взаимодействия точечных зарядов, $|q_1|$ и $|q_2|$ – модули этих зарядов, r – расстояние между ними, k – коэффициент пропорциональности. Силы взаимодействия точечных зарядов направлены вдоль прямой, соединяющей эти заряды, и являются силами притяжения, если заряды имеют разные знаки, и силами отталкивания, если их знаки одинаковы.

В СИ значение коэффициента пропорциональности для вакуума и воздуха $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2$.

Вопросы

- 1 Дайте определение точечного заряда.
- 2 Какие частицы обладают наименьшими по модулю электрическими зарядами? Чему равны эти заряды?
- 3 Как называют единицу заряда в СИ?
- 4 Для каких заряженных тел справедлив закон Кулона?
- 5 Каким образом Кулон получал разные по модулю заряды?
- 6 Опишите способ снятия заряда с шарика *B* в опыте Кулона.

Упражнения

- 1 Как изменится модуль силы взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в воздухе, если расстояние между ними увеличить в два раза? Если при неизменном расстоянии между ними один из них увеличить в четыре раза?
- 2 Как изменится модуль силы взаимодействия двух точечных неподвижных положительных зарядов в воздухе, если оба заряда увеличить в два раза, а расстояние между ними увеличить в шесть раз?
- 3 Выразите в кулонах заряд, равный 6 нКл, 11 пКл, 56 мкКл.
- 4 Выразите элементарный заряд в нанокулонах.
- 5 Определите силу взаимодействия двух неподвижных точечных зарядов $q_1 = 5 \text{ мкКл}$ и $q_2 = 6 \text{ нКл}$, находящихся в воздухе на расстоянии $r = 3 \text{ м}$.
- 6 Найдите расстояние между заряженными шариками в эксперименте Кулона, если модуль силы взаимодействия между ними равен 0,2 мН, а шарики имеют заряды по 1,5 мкКл каждый.
- *7 От каждого атома лития отделяется по одному электрону. Оцените общий заряд свободных электронов в 1 кг лития. Масса одного атома лития $m = 7 \text{ а. е. м.}$
- 8 С какой по модулю силой могли бы взаимодействовать два одинаковых шарика из лития массой по 1 г на расстоянии $r = 1 \text{ м}$, если бы все свободные электроны одного шарика удалось передать другому? Считайте, что каждый атом лития отдаёт по одному электрону.



§ 38

Для дополнительного изучения

Сложение электрических сил

Закон Кулона позволяет рассчитать электрическую силу \vec{F}_1 , действующую на точечный заряд q со стороны другого точечного заряда q_1 , только если отсутствуют другие заряды. Точно так же можно рассчитать силу \vec{F}_2 , действующую на этот же заряд q со стороны точечного заряда q_2 , но опять же при отсутствии других зарядов (в том числе и заряда q_1). Говоря иначе, закон Кулона позволяет найти электрическую силу действия одного точечного заряда на другой только в случае, когда отсутствуют другие заряды.

А каково будет общее действие электрических сил на точечный заряд q при одновременном действии обоих зарядов — q_1 и q_2 ? А если на такой заряд q одновременно будут действовать десять или большее число зарядов?

Будем считать, что все заряды расположены на одной прямой. В этом случае мы можем воспользоваться правилами сложения сил, действующих вдоль одной прямой, как это делалось при изучении механики.

Можно предположить, что электрические силы, действующие на заряд q со стороны других зарядов, будут просто складываться по правилу сложения сил. Однако нельзя исключить того, что действие заряда q_1 на заряд q может препятствовать действию заряда q_2 на заряд q . В этом случае суммарное действие сил может быть иным.

Чтобы понять, в чём состоит проблема, рассмотрим простой пример. Представим себе, что в вашем школьном дворе застрял многотонный грузовик. Ученики вашего класса взялись помочь водителю вытолкнуть грузовик из ямы. Когда сделать это им не удалось, они позвали на помощь учеников всей школы. Понятно, что если сложить силы действия всех людей на застрявший грузовик, то суммарной силы хватит для решения задачи. Однако не исключено, что все собравшиеся помощники не смогут одновременно воздействовать на застрявшую машину. Люди в передних рядах будут мешать другим.

Произойдёт ли нечто подобное при одновременном действии нескольких зарядов на один заряд?

В результате многочисленных экспериментов удалось установить, что действие заряда q_1 на заряд q не зависит от того, есть ли поблизости другие заряды — q_2 , q_3 и т. д. Можно сказать, что заряды «не мешают» друг другу действовать на заряд q .



Таким образом, для определения суммы сил, действующих со стороны нескольких зарядов на заряд q , надо:

- 1) найти по отдельности модули каждой из сил, действующих на заряд q ;

- 2) определить направления действия этих сил;
- 3) сложить полученные силы по правилу сложения сил.

Правило нахождения суммарной электрической силы, действующей на точечный заряд, называют *принципом суперпозиции*.

Если на точечный заряд q одновременно действует несколько зарядов q_1, q_2, \dots, q_n , то суммарная сила \vec{F} их действия равна сумме сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, с которыми каждый из этих зарядов соответственно действовал бы на заряд q при отсутствии остальных зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Для того чтобы научиться использовать принцип суперпозиции, рассмотрим решение следующей задачи.

Задача. На рис. 77 изображены три точечных заряда, расположенные на одной прямой. В точке 1 находится отрицательный заряд $q_1 = -1 \text{ мКл}$, в точке 2 – положительный заряд $q_2 = 2 \text{ мКл}$, а в точке A – положительный заряд $q = 2 \text{ мКл}$. Определите электрическую силу \vec{F} (модуль и направление), действующую на заряд q со стороны зарядов q_1 и q_2 . Расстояние r_1 от точки 1 до точки A равно расстоянию r_2 от точки A до точки 2: $r = r_1 = r_2 = 60 \text{ см}$.

Решение.

1) Найдём модули сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , действующих на заряд q со стороны соответственно зарядов q_1 и q_2 . Для этого воспользуемся законом Кулона (с учётом принципа суперпозиции):

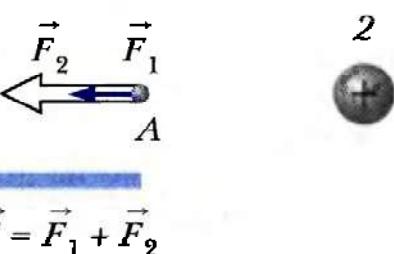


Рис. 77

Направление сил, действующих на заряд q в точке A со стороны зарядов q_1 и q_2

$$|\vec{F}_1| = k \frac{|q| \cdot |q_1|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{0,6^2} = 0,05 \text{ (Н)},$$

$$|\vec{F}_2| = k \frac{|q| \cdot |q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{0,6^2} = 0,1 \text{ (Н)}.$$

2) Определим направления действия сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 .

Так как заряды q_1 и q имеют разные знаки, то заряд q притягивается к заряду q_1 . Поэтому сила \vec{F}_1 направлена от точки A к точке 1. Заряды q_2 и q одного знака. Поэтому они отталкиваются. Следовательно, сила \vec{F}_2 направлена в ту же сторону, что и сила \vec{F}_1 . По принципу суперпозиции суммарная сила $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$.

3) По правилу сложения сил, так как силы \vec{F}_1 и \vec{F}_2 направлены в одну сторону, суммарная сила \vec{F} будет направлена в ту же сторону. Модуль силы $|\vec{F}|$ будет равен:

$$|\vec{F}| = |\vec{F}_1| + |\vec{F}_2| = k \frac{|q| \cdot |q_1|}{r^2} + k \frac{|q| \cdot |q_2|}{r^2} = 0,05 + 0,1 = 0,15 \text{ (Н).}$$

Ответ: модуль силы $|\vec{F}| = 0,15$ Н, сила \vec{F} направлена от точки A к точке 1.

Итоги

Закон Кулона позволяет вычислить электрическую силу действия одного точечного заряда на другой заряд в вакууме только в случае, когда отсутствуют другие заряды.

Действие одного заряда на другой заряд не зависит от того, есть ли поблизости другие заряды.

Электрические силы, действующие на заряд со стороны других зарядов, складываются по правилу сложения сил.

Для определения суммы сил, действующих со стороны нескольких зарядов на заряд q , надо:

- 1) найти по отдельности модули каждой из сил, действующих на заряд q ;
- 2) определить направления действия этих сил;
- 3) сложить полученные силы по правилу сложения сил.

Правило нахождения суммарной электрической силы, действующей на точечный заряд, называют *принципом суперпозиции*.

Если на точечный заряд q одновременно действует несколько зарядов q_1, q_2, \dots, q_n , то суммарная сила \vec{F} их действия равна сумме сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, с которыми каждый из этих зарядов соответственно действовал бы на заряд q при отсутствии остальных зарядов:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Вопросы

- 1 Зависит ли действие заряда q_1 на заряд q от того, есть ли proximity другие заряды?
- 2 Как определить сумму сил, действующих со стороны нескольких зарядов на один заряд?
- 3 Что называют принципом суперпозиции?

Упражнения

- 1 Два положительных точечных заряда q_1 и q_2 , равные 1 нКл каждый, расположены на расстоянии $r = 1$ см. Определите электрическую силу \vec{F} (модуль и направление), действующую на заряд $q_3 = 2$ нКл, расположенный в середине отрезка, соединяющего заряды q_1 и q_2 .
- 2 Два точечных заряда — отрицательный q_1 и положительный q_2 , модули которых $|q_1| = |q_2| = 4$ мкКл, расположены на расстоянии $r = 12$ см. Найдите электрическую силу \vec{F} (модуль и направление), действующую на заряд $q_3 = 6$ нКл, расположенный в середине отрезка, соединяющего заряды q_1 и q_2 .
- *3 Докажите, что суммарная электрическая сила, действующая на расположенный в точке B заряд q со стороны двух равных по модулю отрицательных зарядов q_1 и q_2 ($|q_1| = |q_2|$), равна нулю, если расстояние от точки 1 до точки B равно расстоянию от точки B до точки 2 и все заряды расположены на одной прямой.
- *4 Как изменится суммарная сила в задаче 3, если отрицательные заряды q_1 и q_2 заменить: а) на положительные заряды q_1 и q_2 ($|q_1| = |q_2|$); б) на положительные заряды $3q_1$ и $3q_2$?
- *5 Четыре точечных заряда расположены на одной прямой в последовательности 1, 2, 3, 4. В точках 1 и 3 находятся положительные заряды q_1 и q_3 , в точках 2 и 4 — отрицательные заряды q_2 и q_4 . При этом $|q_1| = |q_2| = |q_3| = |q_4| = 2$ мкКл. Определите электрическую силу \vec{F} (модуль и направление), действующую на заряд q_3 со стороны зарядов q_1 , q_2 и q_4 . Расстояние между соседними зарядами одинаково и равно $r = 15$ см.

§ 39

Электрическое поле. Напряжённость — силовая характеристика электрического поля

Мы выяснили, что заряженные тела действуют друг на друга электрическими силами на расстоянии. Как же передаётся действие от одного заряженного тела к другому? Ведь электрическое взаимодействие наблюдается и в вакууме, где между телами вещества нет.

Раньше считалось, что одно заряженное тело *непосредственно* действует на другое заряженное тело. Такое представление о взаимодействии тел было очень распространено. Позже оно было названо теорией дальнодействия, т. е. действием на расстоянии (издалека).

Развитие науки показало несостоятельность этой теории. Согласно современным представлениям электрический заряд создаёт вокруг себя **электрическое поле**, которое действует на другие заряды. Такое представление о взаимодействии было названо теорией близкодействия. 

! Таким образом, заряженное тело действует на другие тела посредством электрического поля.

Электрическое поле — это особый вид материи. Если в существовании обычных материальных тел мы убеждаемся благодаря зрению, осязанию и т. д., то обнаружить электрическое поле при помощи органов чувств мы не можем. Однако это не означает, что такое поле — это что-то нематериальное. Дело в том, что электрическое поле проявляет себя иначе. Мы можем обнаружить и исследовать его экспериментально — по тому действию, которое оно оказывает на заряженные тела.

Для того чтобы выяснить, есть ли электрическое поле в заданной точке пространства, достаточно поместить в эту точку точечный заряд. Он должен быть достаточно малым, чтобы не вызвать поляризацию близко расположенных тел, иначе изучаемое поле изменится в результате перераспределения зарядов на других телах.

Такой точечный заряд называют *пробным зарядом*.

Если на пробный заряд, помещённый в данную точку пространства, действует электрическая сила, то говорят, что в этой точке есть электрическое поле.



Идея поля принадлежит английскому физику Майклу Фарадею (1791–1867). Он считал, что пространство вокруг заряженного тела отличается от пространства с незаряженными телами и представляет собой особую материальную среду, посредством которой происходит взаимодействие удалённых друг от друга заряженных тел.

! Электрическое поле — это особый вид материи, проявляющий себя в действии на электрические заряды.

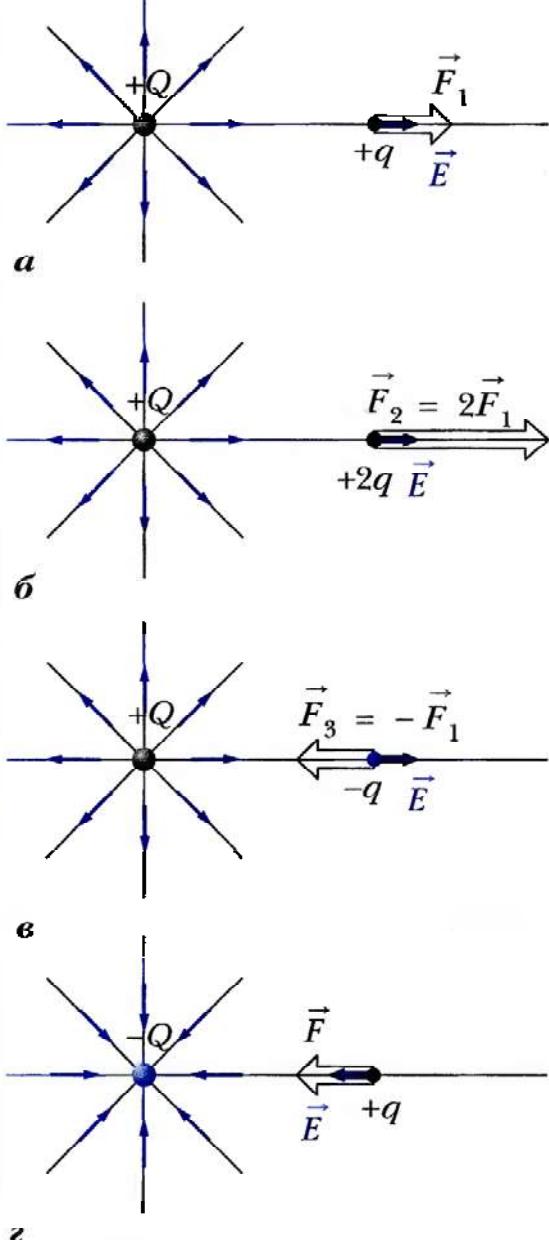


Рис. 78 Электрические силы, действующие на пробный заряд q , обозначены контурными стрелками, а вектора напряженности E — синими стрелками

Электрическое поле в разных точках пространства может быть различным. Поэтому если мы будем помещать пробный заряд в разные точки пространства, то электрические силы, действующие на тело, могут отличаться друг от друга как по направлению, так и по модулю. Следовательно, при помощи пробного заряда мы сможем обнаружить различия в проявлениях электрического поля в разных точках, а значит, и описать само поле.

Опишем электрическое поле, создаваемое положительным точечным зарядом Q . Рассмотрим точку пространства, находящуюся, например, на расстоянии r от заряда Q . Поместим в эту точку положительный пробный заряд q (рис. 78, *a*). Согласно закону Кулона на пробный заряд будет действовать сила, модуль которой

$$|\vec{F}_1| = k \frac{Q \cdot q}{r^2}.$$

Знаки зарядов совпадают. Поэтому сила \vec{F}_1 направлена вдоль прямой, соединяющей заряды, в сторону от заряда Q . Видно, что сила \vec{F}_1 зависит не только от создающего электрическое поле заряда Q и расстояния r , но и от пробного заряда q . Таким образом, сила \vec{F}_1 не может однозначно описать электрическое поле, которое создаётся зарядом Q .

Заменим заряд q на заряд вдвое больший (рис. 78, *b*). В этом случае

по закону Кулона модуль силы, действующей на пробный заряд $2q$, также увеличится в два раза:

$$|\vec{F}_2| = k \frac{Q \cdot 2 \cdot q}{r^2} = 2 \cdot |\vec{F}_1|.$$

Понятно, что **увеличение** (или **уменьшение**) пробного заряда в n раз будет приводить к **увеличению** (или **уменьшению**) в такое же число раз и **действующей на него силы** \vec{F} электрического поля. Следовательно,

! отношение модуля электрической силы, действующей на положительный пробный заряд, к этому заряду остаётся величиной **постоянной**:

$$\frac{|\vec{F}_1|}{q} = \frac{|\vec{F}_2|}{2 \cdot q} = \frac{|\vec{F}_n|}{n \cdot q} = k \frac{Q \cdot n \cdot q}{r^2 \cdot n \cdot q} = k \frac{Q}{r^2} = \text{const.}$$

Полученная величина **не зависит от пробного заряда q** . Её называют **модулем напряжённости** электрического поля, созданного зарядом Q в точке, удалённой от этого заряда на расстояние r .

Модуль напряжённости описывает интенсивность действия электрического поля на пробный заряд, но не указывает направление, в котором поле действует на пробный заряд.

Для полного описания электрического поля в данной точке используют векторную величину — **напряжённость** электрического поля. За направление напряжённости принимают направление силы электрического поля, действующей на **положительный** пробный заряд.

Напряжённость обозначают символом \vec{E} .

Напряжённостью \vec{E} электрического поля в данной точке называют физическую величину, равную отношению силы \vec{F} электрического поля, действующей на помещённый в данную точку пробный положительный заряд q , к этому заряду:

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

Понятно, что **напряжённость \vec{E} электрического поля, созданного положительным точечным зарядом Q , в любой точке пространства направлена в сторону от этого заряда**. Модуль напряжённости в соответствии с законом Кулона $|\vec{E}| = k \frac{|Q|}{r^2}$, где r — расстояние от заряда Q до рассматриваемой точки.

На рис. 78 напряжённости \vec{E} электрического поля, созданного зарядом $+Q$ (или $-Q$), изображены векторами синего цвета.

Если известна напряжённость \vec{E} электрического поля в некоторой точке, то можно определить силу \vec{F} электрического поля, с которой оно будет действовать на помещённый в эту точку пробный заряд q . Для этого надо заряд q умножить на известную напряжённость \vec{E} :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}.$$

Модуль этой силы равен произведению модуля заряда на модуль напряжённости:

$$F = |q| \cdot E.$$

Для определения направления силы \vec{F} надо посмотреть на знак заряда q . Если этот заряд положительный, то направление искомой силы \vec{F} совпадает с направлением \vec{E} (см. рис. 78, *а* и *б*). Если же заряд q отрицательный, то направление действующей на него силы \vec{F} противоположно направлению напряжённости \vec{E} (рис. 78, *в*).

! Таким образом, напряжённость определяют через силу действия электрического поля на пробный заряд. Напротив, зная напряжённость в данной точке, можно найти силу электрического поля, действующую на помещённый в эту точку заряд. По этим двум причинам напряжённость называют **силовой характеристикой поля**.

 Поскольку принцип суперпозиции справедлив для электрических сил, то он справедлив и для напряжённостей.

Суммарная напряжённость \vec{E} электрического поля, созданного в данной точке пространства системой из N зарядов, равна сумме напряжённостей $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_N$, которые создаёт в этой точке каждый из зарядов при отсутствии остальных: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_N$. 

Итоги

Электрический заряд создаёт вокруг себя электрическое поле. Созданное этим зарядом поле действует на другие заряды.

Электрическое поле – это особый вид материи, проявляющий себя в действии на электрические заряды.

Если заряд точечного тела настолько мал, что практически не вызывает поляризацию окружающих тел, то это тело называют **пробным зарядом**.

Если на пробный заряд, помещённый в данную точку пространства, действует электрическая сила, то говорят, что в этой точке есть электрическое поле.

Напряжённостью \vec{E} электрического поля в данной точке называют физическую величину, равную отношению силы \vec{F} электрического поля, действующей на помещённый в данную точку пробный положительный заряд q , к этому заряду:

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

Напряжённость электрического поля, созданного положительным точечным зарядом Q , в любой точке пространства направлена в сторону от этого заряда, а её модуль в соответствии с законом Кулона:

$$|\vec{E}| = k \frac{|Q|}{r^2},$$

где r – расстояние от заряда Q до рассматриваемой точки.

Если известна напряжённость \vec{E} электрического поля в некоторой точке, то можно определить силу \vec{F} электрического поля, действующую на пробный заряд q :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}.$$

Напряжённость электрического поля является его силовой характеристикой.

Вопросы

1. Что такое электрическое поле?
2. Что такое пробный заряд?
3. Как определить наличие электрического поля в данной точке?
4. Что называют напряжённостью электрического поля?
5. Как определить силу, действующую на пробный заряд, помещённый в точку с известной напряжённостью?
6. Как изменится эта сила, если уменьшить заряд в десять раз?
7. Как направлен в некоторой точке пространства вектор напряжённости \vec{E} электрического поля, созданного точечным зарядом?
8. Чему равен в некоторой точке пространства модуль напряжённости электрического поля, созданного точечным зарядом?
9. Почему напряжённость называют силовой характеристикой электрического поля?

- 9 В чём состоит принцип суперпозиции для напряжённостей электрического поля?

Упражнения

- 1 Укажите направление силы на рис. 78, г, действующей на заряд $-Q$ со стороны заряда $+q$.
- 2 Определите модуль напряжённости электрического поля в некоторой точке пространства, если известно, что в этой точке на заряд $q = 2 \text{ нКл}$ действует сила, модуль которой $F = 0,4 \text{ мкН}$.
- 3 На точечный заряд, равный 10 нКл , действует сила электрического поля, равная по модулю 1 Н . Определите модуль напряжённости электрического поля в точке, где находится заряд.
- 4 Модуль напряжённости электрического поля, создаваемого ядром атома водорода на расстоянии 10^{-10} м , что соответствует диаметру электронной орбиты, приблизительно равен $1,44 \cdot 10^{11} \text{ Н/Кл}$. Оцените силу электрического притяжения электрона к ядру атома водорода.

§ 40

Силовые линии электрического поля. Однородное электрическое поле

Чтобы наглядно изображать созданное зарядами электрическое поле, используют так называемые *силовые линии*. Что это такое?

Для примера рассмотрим уже известное вам поле положительного точечного заряда Q . Изобразим векторы напряжённости электрического поля в разных точках пространства (рис. 79). Отметим, что, во-первых, напряжённость в любой точке пространства направлена вдоль прямой, проходящей через точечный заряд Q и данную точку, в сторону от этого заряда. Во-вторых, с увеличением расстояния от заряда Q до рассматриваемой точки напряжённость уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния. Поэтому в точках, расположенных на одинаковых расстояниях от заряда Q , модули напряжённостей одинаковы.

Соединим между собой точки, через которые проходят векторы напряжённости, имеющие одно направление. Получатся прямые линии. Они и будут в данном случае силовыми линиями электрического поля, созданного точечным зарядом Q (рис. 80). На силовых линиях принято ставить стрелки, которые указывают направление вектора напряжённости на данной силовой линии.

Понятно, что силовые линии электрического поля, созданного отрицательным точечным зарядом $-Q$, будут выглядеть так, как показано на рис. 80, а.

Рассматривая картину силовых линий электрического поля, можно сделать несколько выводов о характере этого поля. Во-первых, по направлению стрелки на силовой линии можно определить направление напряжённости в данной точке (рис. 80, б). Во-вторых, по густоте силовых линий в данной области пространства можно судить о модуле напряжённости. Чем гуще линии, тем больше модуль напряжённости. Действительно, чем дальше удаляется рассматриваемая точка от точечного заряда Q , тем меньше густота силовых линий, так как они расходятся. Это соответствует уменьшению модуля напряжённости при удалении от заряда. Понятно, что на одинаковых расстояниях от заряда Q густота силовых линий одинакова (см. рис. 79).



По направлению стрелки на силовой линии можно определить направление напряжённости в данной точке. По густоте силовых линий в данной области пространства можно судить о модуле напряжённости. Чем гуще линии, тем больше модуль напряжённости.

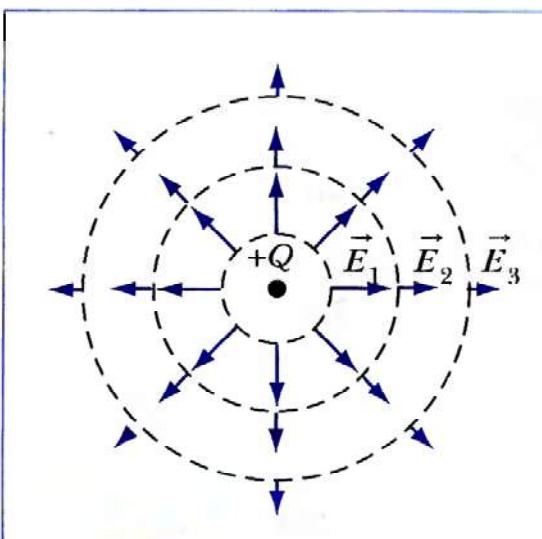
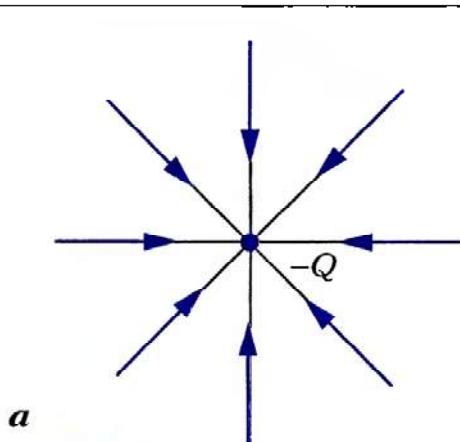
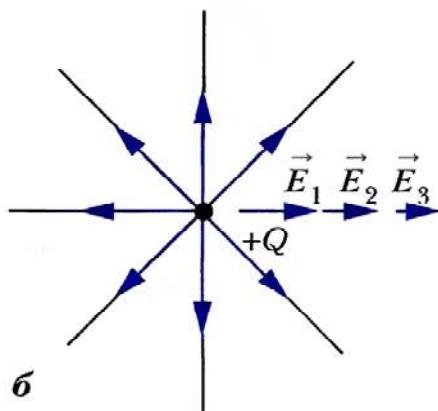


Рис. 79

Напряжённости электрического поля положительного точечного заряда Q



а



б

Рис. 80

Силовые линии электрических полей, созданных: а – отрицательным точечным зарядом $-Q$; б – положительным точечным зарядом $+Q$

Силовые линии электрического поля, создаваемого несколькими зарядами, могут быть и не прямолинейными. Для примера на рис. 81, *а* приведены силовые линии электрического поля двух одинаковых по модулю, но противоположных по знаку точечных зарядов.

Для того чтобы определить направление напряжённости в таком поле, например в точке *A*, надо построить вектор, выходящий из этой точки, касательный к проходящей через эту точку силовой линии. Причём направление напряжённости должно совпадать с направлением стрелки на силовой линии в точке касания.

Таким образом, силовыми линиями называют непрерывные линии, касательные к которым в каждой их точке совпадают с векторами напряжённости в этих точках.

На рис. 81, *б* приведены силовые линии электрического поля, созданного двумя одинаковыми по модулю и знаку зарядами. Обратим внимание на то, что при приближении к точке *B* густота силовых линий стремится к нулю.

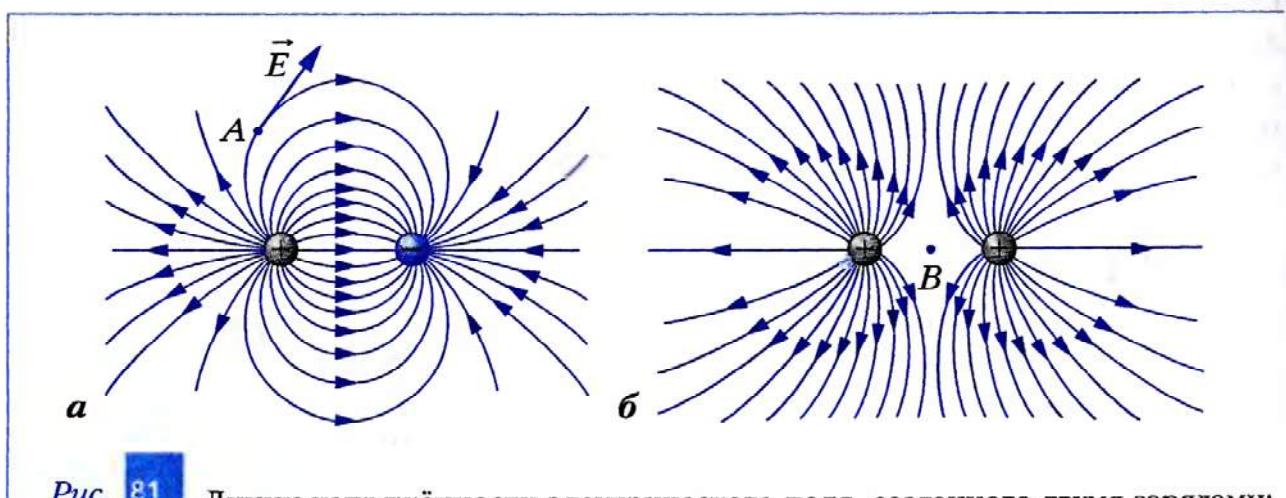


Рис. 81

Линии напряжённости электрического поля, созданного двумя зарядами:
а – разных знаков; *б* – одного знака

На рис. 82 показаны силовые линии электрического поля между двумя параллельными пластинами, имеющими равные по модулю, но противоположные по знаку заряды. Эксперимент показывает, что в такой системе заряды обеих пластин собираются на их внутренних поверхностях. При этом в области между пластинами вдали от их краёв все силовые линии, во-первых, параллельны, во-вторых, имеют постоянную густоту.

Следовательно, в этой области пространства напряжённости во всех точках, во-первых, одинаково направлены, во-вторых, равны по модулю.

Поле, напряжённость которого во всех точках одинакова (по модулю и направлению), называют однородным.

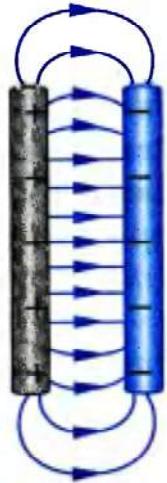


Рис. 82 Силовые линии электрического поля двух параллельных пластин, имеющих равные по модулю, но противоположные по знаку заряды

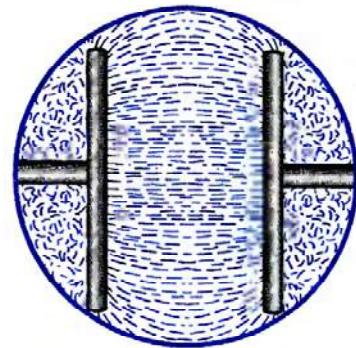


Рис. 83 Продолговатые крупинки манки под действием сил электрического поля выстраиваются вдоль силовых линий

Итак, мы приходим к выводу, что *между параллельными пластинами, имеющими равные по модулю, но противоположные по знаку заряды, электрическое поле вдали от их краёв является однородным*.

В действительности, конечно, никаких силовых линий у поля не существует. Эти линии были предложены английским физиком Майклом Фарарадеем (1791–1867) для наглядного графического изображения электрического поля.

Тем не менее силовые линии можно «увидеть». Для этого область пространства между изучаемыми зарядами заполняют вязкой жидкостью, например касторовым маслом, с которым перемешаны частички диэлектрика — манной крупы. Тогда в целом электрически нейтральные продолговатые крупинки манки под действием сил электрического поля развернутся и ориентируются вдоль поля. Образованные этими крупинками цепочки будут представлять собой картину, близкую к картине силовых линий изучаемого поля. Картина распределения крупинок манки в электрическом поле, созданном двумя разноимённо заряженными параллельными пластинами, приведена на рис. 83.

В заключение отметим, что силовые линии электрического поля, созданного электрическими зарядами, всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах.

Силовые линии, изображённые на рис. 80, б, которые, как кажется, «уходят» от положительного заряда в бесконечность, на самом деле закончатся на отрицательных зарядах, только расположенных очень далеко. Соответственно линии, «приходящие» к отрицательному заряду (см. рис. 80, а), начинаются на расположенных очень далеко положительных зарядах.

Отметим, что на любой пробный заряд, помещённый в данную точку электрического поля, действует *только одна* суммарная сила этого поля. Поэтому *силовые линии не могут прерываться и пересекаться в точках, где нет электрических зарядов*.

Итоги

Для наглядного графического изображения созданного зарядами электрического поля используют так называемые силовые линии.

Силовыми линиями называют непрерывные линии, касательные к которым в каждой их точке совпадают с векторами напряжённости в этих точках.

По направлению стрелок, которые ставят на силовых линиях, можно определить направление напряжённости в данной точке. По густоте силовых линий в данной области пространства можно судить о модуле напряжённости. Чем гуще линии, тем больше модуль напряжённости электрического поля.

Поле, напряжённость которого во всех точках одинакова (по модулю и направлению), называют однородным.

Электрическое поле между параллельными пластинами, имеющими равные по модулю, но противоположные по знаку заряды, вдали от их краёв является однородным.

Силовые линии электрического поля, созданного заряженными телами, всегда начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных зарядах.

Силовые линии не могут прерываться и пересекаться в точках, где нет электрических зарядов.

Вопросы

1. Что называют силовыми линиями электрического поля?
2. Зачем на силовых линиях ставят стрелки?

- 3** Что характеризует густота силовых линий?
- 4** Как можно «увидеть» силовые линии?
- 5** Какое поле называют однородным? Как можно создать такое поле?
- 6** Где начинаются и заканчиваются силовые линии поля, созданного зарядами?
- *7** Объясните, почему силовые линии не могут прерываться и пересекаться в точках, где нет электрических зарядов.

Упражнения

- 1** Нарисуйте силовые линии электрического поля, созданного:
а) положительным точечным зарядом; б) отрицательным точечным зарядом.
- 2** Нарисуйте силовые линии электрического поля, созданного:
а) двумя равными отрицательными точечными зарядами; б) двумя равными по модулю точечными зарядами разных знаков.
- *3** Чему равна напряжённость электрического поля в точке B на рис. 81, б?

§ 41 Работа сил электрического поля. Напряжение

До сих пор мы описывали электрическое поле с помощью его силовой характеристики — напряжённости. В физике для описания электрического поля используют и другую его характеристику. Для этого рассмотрим несколько электрических зарядов, которые взаимодействуют друг с другом и образуют электрическое поле. При перемещении любого из зарядов сила поля может совершать работу. Чтобы научиться рассчитывать работу сил электрического поля при перемещении в нём заряда, возьмём систему, состоящую из двух положительных точечных зарядов q и Q . Пусть заряд q удаляется от заряда Q . В этом случае действующая на него сила поля, созданного зарядом Q , совершает положительную работу. Следовательно, потенциальная энергия системы уменьшается. Напротив, при приближении заряда q к заряду Q эта сила будет совершать отрицательную работу. В этом случае потенциальная энергия системы будет увеличиваться. Такую систему зарядов можно сравнить со сжатой пружиной. Потенциальная энергия сжатой пружины при её большем сжатии также увеличивается.

Два точечных заряда разных знаков притягиваются друг к другу. Поэтому такую систему с точки зрения её потенциальной энергии можно сравнить с растянутой пружиной.

Однако рассчитать работу электрической силы \vec{F} , действующей со стороны заряда Q на заряд q , мы не можем. Дело в том, что в соответствии с законом Кулона при изменении расстояния между зарядами сила \vec{F} изменяется, т. е. она не является постоянной. Поэтому расчёт работы такой силы требует привлечения ещё не знакомых вам математических приёмов.

В связи с этим при расчёте работы электрических сил мы ограничимся рассмотрением случая, когда сила электрического поля, действующая на перемещаемый заряд, остаётся постоянной. Это возможно, когда поле однородно. Такое поле, как вы знаете, создаётся между параллельными пластинами, имеющими равные по модулю, но противоположные по знаку заряды (рис. 84, *а*). Пусть верхняя пластина заряжена положительно, а нижняя — отрицательно. Напряжённость электрического поля одинакова во всех точках пространства между пластинами *вдали от их краёв* и равна \vec{E} .

Сравним действие однородного электрического поля на помещённый в него положительный точечный заряд q с действием силы тяжести \vec{F}_t на точечное тело массой m вблизи поверхности Земли (рис. 84, *б*).

Сила электрического поля $\vec{F}_{\text{эл}}$, действующая на точечный заряд q , равна произведению этого заряда на напряжённость \vec{E} электрического поля:

$$\vec{F}_{\text{эл}} = q \cdot \vec{E}.$$

Сила тяжести \vec{F}_t , действующая на точечное тело массой m , равна произведению массы m этого тела на ускорение свободного падения \vec{g} :

$$\vec{F}_t = m \cdot \vec{g}.$$

Сравним эти выражения.

Сила тяжести пропорциональна массе m тела, на которое она действует. Сила электрического поля пропорциональна заряду q тела, на которое она действует. Сила тяжести пропорциональна ускорению \vec{g} свободного падения и направлена в ту же сторону, что и \vec{g} . Сила электрического поля пропорциональна напряжённости \vec{E} и направлена в ту же сторону, что и \vec{E} .

Сразу отметим, что всё сказанное про действие на положительный заряд однородного электрического поля будет верно и для отрицательного заряда, кроме утверждения о направлении электрической силы. Понятно, что если внесённый в такое поле заряд будет отрицательным, то направление действующей на него электрической силы изменится на противоположное.

Теперь, после проведённого сравнения силы тяжести и силы электрического поля, перейдём к сравнению совершаемых ими работ при перемещении тел.

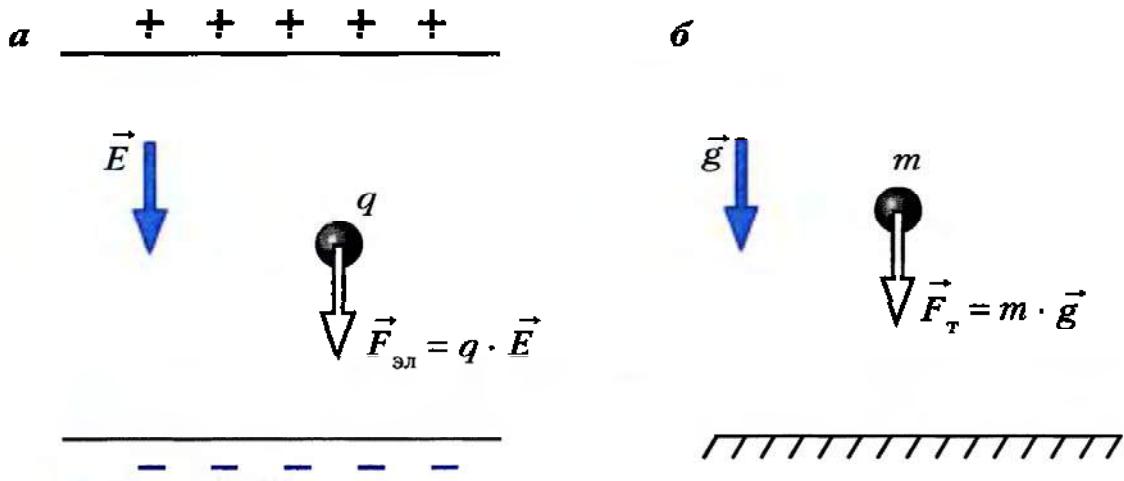


Рис. 84 В однородном электрическом поле (а) на положительный точечный заряд q действует сила $\vec{F}_{\text{эл}} = q \cdot \vec{E}$. На точечное тело массой m вблизи поверхности Земли (б) действует сила тяжести $\vec{F}_t = m \cdot \vec{g}$

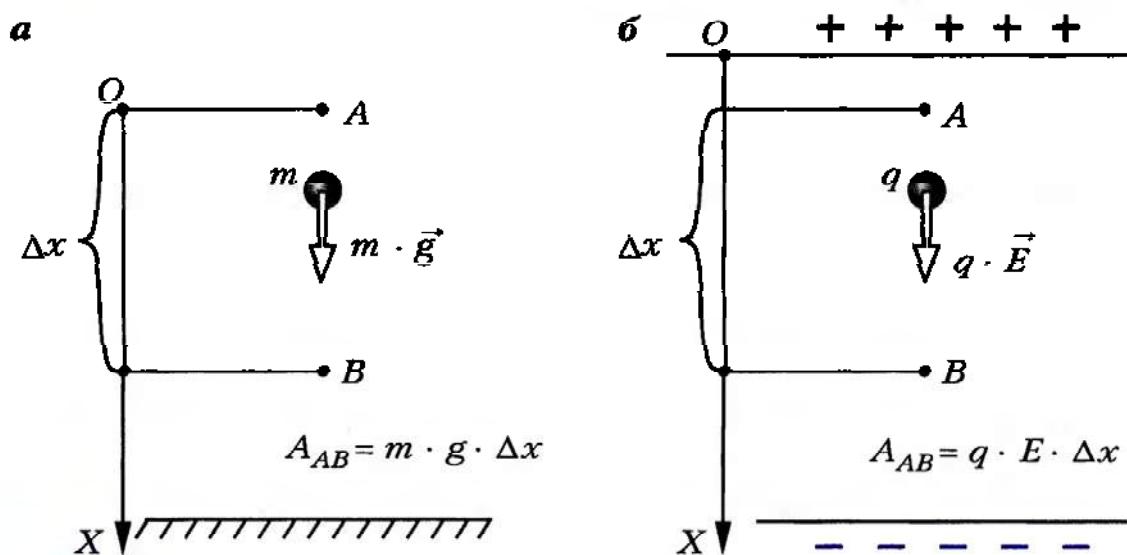


Рис. 85 Сравнение работы силы тяжести по перемещению точечного тела массой m с работой силы однородного электрического поля по перемещению положительного пробного заряда q

Пусть точечное тело массой m перемещается из точки A в точку B на расстояние Δx (рис. 85, а) в направлении силы \vec{F}_t (тело опускается). Тогда в соответствии с определением механической работы работа силы тяжести будет **положительна**:

$$A_{AB} = F_t \cdot \Delta x = m \cdot g \cdot \Delta x.$$

Пусть точечный положительный заряд q перемещается из точки A в точку B на расстояние Δx (рис. 85, б) в направлении силы $\vec{F}_{\text{эл}}$ электрического поля (вдоль силовой линии). Работа электрической силы при этом будет положительна:

$$A_{AB} = \vec{F}_{\text{эл}} \cdot \Delta x = q \cdot E \cdot \Delta x. \blacksquare$$

Видно, что работа сил электрического поля по перемещению любого точечного заряда q прямо пропорциональна этому заряду. Другими словами, увеличение (уменьшение) заряда q в некоторое число раз приведёт к соответствующему увеличению (уменьшению) работы поля в такое же число раз. Это позволяет ввести новую физическую величину — *напряжение*.

Напряжением между двумя точками называют физическую величину, равную отношению работы сил электрического поля при перемещении пробного заряда (из начальной точки в конечную) к этому заряду:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Единица напряжения в СИ — *вольт* ($1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$) — названа в честь итальянского физика Александро Вольты (1745–1827).

! Напряжение между двумя точками, которое определяется через работу поля по перемещению пробного заряда из начальной точки в конечную, не зависит от этого заряда.

$$U = \frac{A}{q} = \frac{E \cdot q \cdot \Delta x}{q} = E \cdot \Delta x.$$

Поэтому напряжение является характеристикой поля. Оно связано с работой поля, следовательно, и с его энергией. По этой причине *напряжение называют энергетической характеристикой поля*.

Из определения следует, что напряжение U между точками A и B , расположеными на одной силовой линии однородного электрического поля напряжённостью E на расстоянии Δx друг от друга, равно:

$$U = E \cdot \Delta x.$$

Из полученной формулы можно сделать несколько выводов.

К Если вместо положительного заряда q из точки A в точку B перемещается отрицательный заряд $-q$, то действующая на него электрическая сила будет направлена в сторону, противоположную перемещению. Поэтому работа электрической силы в этом случае будет отрицательна:

$$A_{AB} = \vec{F}_{\text{эл}} \cdot \Delta x = -q \cdot E \cdot \Delta x.$$

Во-первых, напряжение между точками A и B , расположенными на одной силовой линии, прямо пропорционально напряжённости однородного поля. Чем больше напряжённость поля в пространстве между этими точками, тем больше напряжение между ними. Если напряжённость равна нулю, то и напряжение между точками будет равно нулю.

Во-вторых, напряжение между такими точками в однородном поле прямо пропорционально расстоянию между ними вдоль силовой линии. Чем больше это расстояние, тем больше и напряжение между этими точками.

Кроме того, из определения напряжения следует, что если напряжённость электрического поля \vec{E} направлена от A к B , то напряжение U_{AB} будет положительным. Напротив, если напряжённость электрического поля направлена от B к A , то напряжение U_{AB} будет отрицательным.

Поскольку единицей напряжения в СИ является вольт, единицей длины является метр, то единицу напряжённости электрического поля в СИ обычно называют В/м (вольт на метр). Из определения напряжённости следует, что $1 \text{ В/м} = 1 \text{ Н/Кл}$.

Зная напряжение между двумя точками A и B , можно рассчитать работу сил однородного электрического поля по переносу пробного заряда q из точки A в точку B . Понятно, что из определения напряжения искомая работа $A = U \cdot q$.

Итоги

Работа электрической силы $\vec{F}_{\text{эл}}$ однородного электрического поля при перемещении точечного заряда q на Δx в направлении, совпадающем с направлением напряжённости поля (вдоль силовой линии), равна: $A_{AB} = F_{\text{эл}} \cdot \Delta x = qE \cdot \Delta x$.

Напряжением между двумя точками называют физическую величину, равную отношению работы сил электрического поля при перемещении пробного заряда (из начальной точки в конечную) к этому заряду:

$$U = \frac{A}{q} = \frac{E \cdot q \cdot \Delta x}{q} = E \cdot \Delta x.$$

Единица напряжения в СИ – вольт ($1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл}$).

Напряжение – энергетическая характеристика поля.

Напряжение U между двумя точками, расположенными на одной силовой линии однородного электрического поля напряжённостью \vec{E} на расстоянии Δx друг от друга, равно:

$$U = E \cdot \Delta x.$$

Единица напряжённости в СИ – В/м (вольт на метр).

Вопросы

- 1 Чему равна работа электрической силы $\vec{F}_{эл}$ однородного электрического поля при перемещении точечного заряда q на расстояние Δx в направлении, совпадающем с направлением его напряжённости (вдоль силовой линии)?
- 2 Обладает ли система взаимодействующих электрических зарядов потенциальной энергией? Объясните почему.
- 3 Что называют напряжением?
- 4 Как называют единицу напряжения в СИ?
- 5 Чему равен модуль напряжения между двумя точками, расположенными на одной силовой линии однородного электрического поля напряжённостью E на расстоянии Δx друг от друга?
- 6 Почему напряжение называют энергетической характеристикой электрического поля?

Упражнения

- 1 Напряжение между двумя точками в однородном электрическом поле равно 10 В. Как изменится напряжение между этими точками, если напряжённость этого поля увеличится в пять раз?
- 2 Как изменится напряжение между двумя точками, расположенными на одной силовой линии однородного электрического поля, если расстояние между ними уменьшить в два раза?
- 3 Как изменится напряжение между двумя точками, расположенными на одной силовой линии однородного электрического поля, если направление напряжённости этого поля изменить на противоположное?
- 4 Какую работу совершил однородное электрическое поле при перемещении заряда 15 нКл, если известно, что напряжение между начальной и конечной точками положения заряда равно 220 В?
- 5 Какую работу совершил однородное электрическое поле при перемещении заряда 25 нКл из точки B в точку A , если известно, что напряжение между точками A и B равно 100 В?
- 6 Напряжённость однородного электрического поля равна 5 В/м. Точечный заряд 25 нКл переместили на 10 см вдоль силовой линии поля. Какую работу при этом совершили силы поля? Рассчитайте напряжение между начальной и конечной точками, в которых находился заряд.
- *7 Докажите, что $1 \text{ В/м} = 1 \text{ Н/Кл}$.

§ 42

Конденсаторы. Энергия электрического поля конденсатора

Систему, состоящую из двух изолированных друг от друга металлических проводников, называют **конденсатором**. Обычно эти проводники называют **обкладками** конденсатора. **К**

Конденсаторы используют для накопления электрических зарядов. Они являются важными элементами различных радиотехнических и электромеханических устройств. Без них было бы невозможным создание телевизоров, мобильных телефонов, компьютеров и многих других приборов.

Конденсаторы различаются по форме обкладок и материалу, изолирующему обкладки друг от друга.

Если обкладки конденсатора имеют вид двух тонких плоских параллельных пластин, находящихся друг от друга на малом расстоянии по сравнению с размерами самих пластин, то такой конденсатор называют **плоским**. Очень часто обкладками плоского конденсатора служат две металлические изолированные ленты.

Существуют **сферические** конденсаторы. Их обкладками являются две сферы разного диаметра. Сфера меньшего диаметра помещается внутрь большей сферы. У цилиндрического конденсатора два цилиндра разного диаметра (его обкладки) вставлены один в другой. Существуют конденсаторы, обкладки которых имеют и другие формы.

В качестве изолятора в конденсаторах часто используют специальную бумагу (бумажные конденсаторы), слюдяные пластиинки (слюдяные конденсаторы), керамику (керамические конденсаторы) и т. д.

Когда на обкладки конденсатора наносят электрические заряды (конденсатор заряжают), то возникает электрическое поле. Если нанесённые на обкладки заряды одинаковы по модулю, но противоположны по знаку, то практически всё образованное ими поле оказывается сосредоточенным между обкладками. При этом если конденсатор является плоским, то это поле будет однородным. Отметим, что при такой зарядке пластин конденсатора заряд положительной пластины называют **зарядом конденсатора**.

С электрическим полем, создаваемым равными по модулю, но противоположными по знаку зарядами на пластинах плоского конденсатора, вы познакомились в предыдущих параграфах.

Поле между пластинами конденсатора можно описать с помощью его силовой характеристики – напряжённости \vec{E} и энергетической характеристики



Иногда, вне зависимости от их формы, обкладки конденсатора называют **пластиинами** конденсатора.

ки — модуля U напряжения между точками на разных пластинах. Это напряжение называют напряжением между пластинами конденсатора.

В плоском конденсаторе $U = E \cdot d$, где E — модуль напряжённости в центральной части конденсатора, а d — расстояние между пластинами.

Чем больше заряд конденсатора, тем больше модуль напряжённости \vec{E} электрического поля между его пластинами. При этом увеличивается и модуль U напряжения между пластинами конденсатора.

! Установлено, что модуль U напряжения между пластинами конденсатора прямо пропорционален его заряду q , т. е. увеличение (уменьшение) заряда конденсатора в некоторое число раз приводит к увеличению (уменьшению) модуля U напряжения между его обкладками в такое же число раз.

Это позволяет ввести новую физическую величину, характеризующую способность конденсатора накапливать электрический заряд.

Отношение заряда конденсатора к модулю напряжения между его пластинами называют электрической ёмкостью конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Единица электрической ёмкости в СИ — *фарад* (Φ); $1 \Phi = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В}$.



От чего зависит электрическая ёмкость конденсатора

Ёмкость конденсатора определяется в основном его геометрическими характеристиками и свойствами диэлектрика между его обкладками.

Экспериментально установлено, что при увеличении площади S пластин плоского конденсатора и одновременном увеличении во столько же раз его заряда q напряжённость \vec{E} остаётся неизменной. Поэтому чем большая площадь пластин S , тем больший заряд q при том же напряжении U может накопить конденсатор.

Следовательно, электрическая ёмкость C плоского конденсатора прямо пропорциональна площади S его пластин.

Если заряд q конденсатора и площадь S его пластин неизменны, то при увеличении расстояния d между пластинами напряжённость \vec{E} электрического поля также остаётся неизменной. Так как $U = E \cdot d$, то модуль U напряжения при этом увеличивается. Поскольку $C = \frac{q}{U}$, то электрическая ёмкость C конденсатора в данном случае уменьшается.

Подведём итог.



Электрическая ёмкость C плоского конденсатора прямо пропорциональна площади S его пластин и обратно пропорциональна расстоянию d между ними.

Введение диэлектрика между пластинами при неизменном заряде q конденсатора приводит к уменьшению напряжённости E электрического поля между его пластинами, так как на границах диэлектрика образуются поляризационные заряды. При этом уменьшается модуль U напряжения (равный произведению E на d) между пластинами конденсатора. В результате увеличивается электрическая ёмкость C конденсатора, равная $\frac{q}{U}$.



Таким образом, введение прокладок из диэлектрических материалов между пластинами конденсатора приводит к увеличению его электрической ёмкости.

Как и любая система зарядов, конденсатор в заряженном состоянии обладает энергией. Действительно, пластины конденсатора, имеющие заряды разных знаков, притягиваются друг к другу (рис. 86). Поэтому заряженный конденсатор можно сравнить с растянутой пружиной.

Пусть одна из пластин плоского конденсатора остаётся неподвижной, а другая приближается к ней. В этом случае электрическая сила, действующая на движущуюся пластину со стороны неподвижной пластины, будет совершать положительную работу.

После касания пластин излишek свободных электронов с отрицательно заряженной пластиной перейдёт на положительно заряженную пластину. В результате заряды обеих пластин станут равными нулю. После этого пластины перестанут электрически взаимодействовать и электрические силы не смогут совершать работу. Такой конденсатор называют *незаряженным (разряженным)*.

В незаряженном состоянии энергия электрического поля конденсатора равна нулю.

До того как заряженные пластины конденсатора начали сближаться, система была способна совершать работу. Поэтому конденсатор обладал энергией. Ясно, что эта энергия равна работе электрической силы, действующей на движущуюся пластину при её перемещении в направлении неподвижной пластины (до касания пластин). Для определения энергии электрического поля, запасённой в конденсаторе, рассчитаем эту работу.

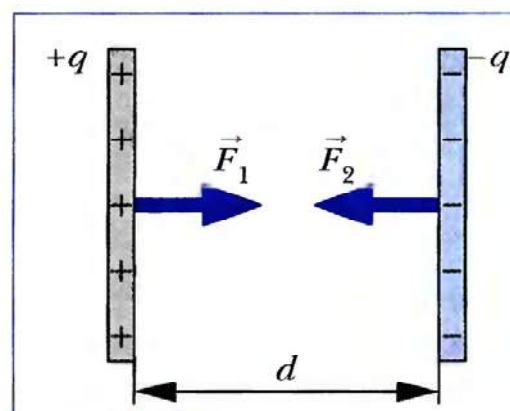


Рис. 86

С этой целью определим силу \vec{F} электрического поля, с которой неподвижная пластина 1 действует на перемещающуюся к ней пластину 2.

Напряжённость E электрического поля между пластинами есть результат сложения полей обеих пластин. Заряды пластин конденсатора противоположны по знаку. Поэтому напряжённости \vec{E}_1 и \vec{E}_2 их полей между пластинами направлены в одну сторону. Следовательно, при сложении \vec{E}_1 и \vec{E}_2 их модули будут складываться: $E = E_1 + E_2$. Кроме того, заряды пластин равны по модулю, а расстояние между пластинами мало по сравнению с их размерами. Логично предположить, что создаваемые пластинами поля равны между собой: $\vec{E}_1 = \vec{E}_2$. Это предположение подтверждается экспериментально и может быть получено с помощью математических приёмов (в старших классах мы сделаем это). Следовательно, $E_1 = E_2 = \frac{E}{2}$.

На пластину 2 действует только электрическое поле напряжённостью E_1 , созданное пластиной 1. Поэтому искомая сила по модулю равна $F = E_1 \cdot q = \frac{E}{2} \cdot q$.

Мы уже отмечали, что при изменении начального расстояния d между пластинами плоского конденсатора напряжённость E электрического поля между ними не изменяется. Поэтому при перемещении пластины 2 действующая на неё сила остаётся постоянной. Работа этой силы при перемещении пластины 2 в направлении пластины 1 (до касания) равна:

$$A = F \cdot d = \frac{E \cdot q}{2} \cdot d = \frac{q \cdot (E \cdot d)}{2} = \frac{q \cdot U}{2},$$

так как $E \cdot d = U$, где d – начальное расстояние между пластинами.

Таким образом, энергия W электрического поля, запасённая в заряженном конденсаторе:

$$W = \frac{q \cdot U}{2}.$$

Если использовать определение электрической ёмкости C конденсатора ($C = \frac{q}{U}$), то полученную формулу можно записать тремя способами:

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

где q – заряд конденсатора, U – модуль напряжения между пластинами конденсатора, C – его электрическая ёмкость.

Подчеркнём, что полученные формулы для расчёта энергии W электрического поля, запасённой в заряженном конденсаторе, справедливы не только для плоских конденсаторов, но и для конденсаторов любой формы.

Систему, состоящую из двух изолированных друг от друга металлических проводников, называют конденсатором. Эти проводники называют обкладками (пластинами) конденсатора.

Конденсаторы используют для накопления электрических зарядов.

Если обкладки конденсатора имеют вид двух тонких плоских параллельных пластин, находящихся друг от друга на малом по сравнению с размерами самих пластин расстоянии, то такой конденсатор называют плоским.

Если нанесённые на пластины плоского конденсатора заряды одинаковы по модулю, но противоположны по знаку, то поле между пластинами считают однородным. При такой зарядке пластин конденсатора заряд положительной пластины называют *зарядом конденсатора*.

Модуль напряжения между точками, находящимися на разных пластинах конденсатора, называют модулем напряжения между его пластинами.

В плоском конденсаторе $U = E \cdot d$, где U – модуль напряжения между пластинами, E – модуль напряжённости электрического поля, а d – расстояние между его пластинами.

Отношение заряда конденсатора к модулю напряжения между его пластинами называют электрической ёмкостью конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Единица электрической ёмкости в СИ – фарад ($1 \Phi = 1 \text{ Кл}/1 \text{ В}$).

Заряженный конденсатор обладает энергией:

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

где q – заряд конденсатора, U – модуль напряжения между его пластинами, C – его электрическая ёмкость.

Полученные формулы для расчёта энергии электрического поля, запасённой в заряженном плоском конденсаторе, справедливы для конденсаторов любой формы.

Вопросы

- 1 Что называют конденсатором? Для чего используются конденсаторы?
- 2 Какие виды конденсаторов вы знаете?
- 3 Какое поле образуется между пластинами плоского конденсатора, если нанесённые на них заряды одинаковы по модулю, но противоположны по знаку? Что в этом случае называют зарядом конденсатора?
- 4 Какими характеристиками можно описать электрическое поле плоского конденсатора?
- 5 Что называют напряжением между пластинами конденсатора?
- 6 Как изменится напряжённость однородного электрического поля и напряжение между пластинами плоского конденсатора, если его заряд: а) увеличить в два раза; б) уменьшить в три раза?
- 7 Изменится ли напряжение между пластинами плоского конденсатора, если их слегка раздвинуть?
- 8 Что называют электрической ёмкостью конденсатора?
- 9 Какую работу может совершить сила электрического поля при сближении пластин плоского конденсатора?
- 10 Чему равна электрическая энергия заряженного конденсатора?

Упражнения

- 1 Напряжение между пластинами плоского конденсатора $U = 1 \text{ кВ}$, а расстояние между ними $d = 1 \text{ мм}$. Определите модуль напряжённости электрического поля между пластинами конденсатора.
- 2 Определите энергию заряженного конденсатора ёмкостью $C = 2 \text{ мкФ}$, если его заряд равен $q = 0,2 \text{ мКл}$.
- 3 Оцените энергию, которая выделится при разряде конденсатора электрошокера ёмкостью $C = 100 \text{ пФ}$, заряженного до напряжения $U = 10 \text{ кВ}$.
- 4 Энергия заряженного плоского воздушного конденсатора ёмкостью $C = 200 \text{ пФ}$ равна $W = 10 \text{ мДж}$. Определите заряд этого конденсатора и модуль напряжения между его пластинами.
- * 5 Определите модуль силы электрического взаимодействия между пластинами конденсатора из задачи 4, если расстояние между ними $d = 5 \text{ мм}$.
- 6 Познакомьтесь с различными видами конденсаторов, имеющихся в школьном кабинете физики. Выясните, что означают надписи на корпусах конденсаторов.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Силы, с которыми наэлектризованное тело взаимодействует с другими телами, называют электрическими силами. Про такое тело говорят, что оно обладает электрическим зарядом (заряжено).

Электрический заряд тела – физическая величина, характеризующая способность тела к электрическим взаимодействиям.

Существуют только два вида зарядов. Их условно называют положительными и отрицательными.

Заряженные точечные тела называют точечными зарядами.

Закон Кулона

Два точечных неподвижных заряда взаимодействуют между собой в вакууме с силой, модуль которой равен:

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

где $|q_1|$ и $|q_2|$ – модули этих зарядов, r – расстояние между зарядами, $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{Кл}^2$ – коэффициент пропорциональности.

Точечные заряды притягиваются, если они имеют разные знаки, и отталкиваются, если их знаки одинаковы.

Закон сохранения электрического заряда

Алгебраическая сумма электрических зарядов системы тел остаётся неизменной, если в неё не поступают заряды извне и из неё не уходят заряды.

Наименьшими по модулю электрическими зарядами обладают протон и электрон. Заряд электрона $q_e \approx -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$.

Электрические взаимодействия осуществляются посредством особого вида материи – электрического поля.

Электрическое поле создаётся электрическими зарядами (заряженными или поляризованными телами).

Электрическое поле проявляет себя в действии на электрические заряды.

Электрическое поле в данной точке можно описать при помощи его силовой характеристики – напряжённости:

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

где \vec{F} – сила электрического поля, действующая на помещённый в данную точку пробный положительный заряд q .

Напряжённость электрического поля, созданного положительным точечным зарядом Q , в любой точке пространства направлена в сторону от этого заряда, а её модуль $|\vec{E}| = k \frac{|Q|}{r^2}$, где r – расстояние от заряда Q до рассматриваемой точки.

Поле, напряжённость которого во всех точках одинакова (по модулю и направлению), называют однородным.

Электрическое поле между двумя точками можно описать при помощи его энергетической характеристики – напряжения.

Напряжением между двумя точками называют физическую величину, равную отношению работы сил электрического поля при перемещении пробного заряда (из начальной точки в конечную) к этому заряду:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Систему, состоящую из двух изолированных друг от друга металлических проводников, называют конденсатором.

Отношение заряда конденсатора к модулю напряжения между его пластинами называют электрической ёмкостью конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Энергия электрического поля, запасённая в заряженном конденсаторе:

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

где q – заряд конденсатора, U – модуль напряжения между пластинами конденсатора, C – его электрическая ёмкость.

Постоянный электрический ток

В предыдущей главе мы выяснили, что электрическое поле способно совершать работу и поэтому обладает энергией. Но можно ли использовать энергию электрического поля? Что нужно сделать для того, чтобы получать её продолжительное время? Как лучше распорядиться электрической энергией? Этими вопросами учёные задавались ещё во второй половине XVIII в. Чтобы ответить на них, потребовались дальнейшие исследования электрических явлений.

§ 43

Электрический ток. Условия его возникновения. Электрическая цепь

Все вы знакомы со словами «электрический ток» и знаете, что современную жизнь невозможно представить без устройств, основанных на действии электрического тока. Что же такое электрический ток? Какова его природа?

Прежде чем ответить на этот вопрос, вспомним, как стекает с гор вода, образуя ручей, и ответим на два вопроса. Первый: что движется в ручье? Ответ очевиден: в ручье движется вода — вещество, состоящее из молекул воды.

Вопрос второй: что заставляет воду перемещаться? Каждый скажет, что вода перемещается в результате действия на неё силы тяжести. Именно поэтому вода в ручье течёт сверху вниз. Действие силы тяжести проявляется из-за разности высот между истоком ручья и его устьем. Отметим, что сила тяжести совершает над молекулами воды положительную работу, компенсируя отрицательную работу сил трения. Поэтому потенциальная энергия взаимодействия воды с Землёй при таком движении уменьшается.

Подведём итог. Для того чтобы существовал ручей, необходимо выполнение двух условий: во-первых, нужна вода – вещество, способное перемещаться (течь); во-вторых, нужна сила, компенсирующая возникающие при движении воды силы трения.

Вы уже знаете, что действие электрического поля на помещённый в него заряд подобно действию силы тяжести на тело, имеющее массу. Следовательно, если мы выполним соответствующие условия, то сможем создать «ручей» из электрических зарядов. Что для этого нужно?

Как и в рассмотренном выше примере, нам потребуется выполнение двух условий: во-первых, необходимо наличие заряженных частиц, способных перемещаться. Такие частицы называют свободными носителями заряда. Как вы помните, свободные носители заряда имеются в проводниках. Следовательно, для выполнения первого условия нужен проводник.

Во-вторых, нужна сила, постоянно действующая на свободные носители заряда. Роль такой силы может выполнять, например, сила электрического поля, компенсирующая возникающие при движении зарядов силы со стороны проводника.

! Если в проводнике создать электрическое поле, то имеющиеся в этом проводнике свободные носители зарядов будут двигаться под действием этого поля. В результате мы получим «ручей» из электрических зарядов — электрический ток.

Упорядоченное движение заряженных частиц называют электрическим током.

Что нужно сделать, чтобы электрический ток в проводнике существовал постоянно?

Чтобы ответить на этот вопрос, попробуем вначале создать искусственный *постоянно действующий* водяной ручей. Устройство такого ручья приведено на рис. 87, а. В правой части рисунка показано, как из верхнего сосуда вода под действием силы тяжести перетекает в нижний сосуд. При этом сила тяжести, перемещая воду, совершает положительную работу. В результате мы наблюдаем вращение мельницы под действием движущейся воды. Отметим, что течение воды обусловлено разностью высот между её уровнями в верхнем и нижнем сосудах.

Схожие процессы происходят в проводнике при создании в нём электрического поля. Под действием его сил свободные носители заряда движутся в проводнике. Эти силы при перемещении зарядов совершают положительную работу. В результате мы наблюдаем свечение лампочки, через которую течёт электрический ток (рис. 87, б).

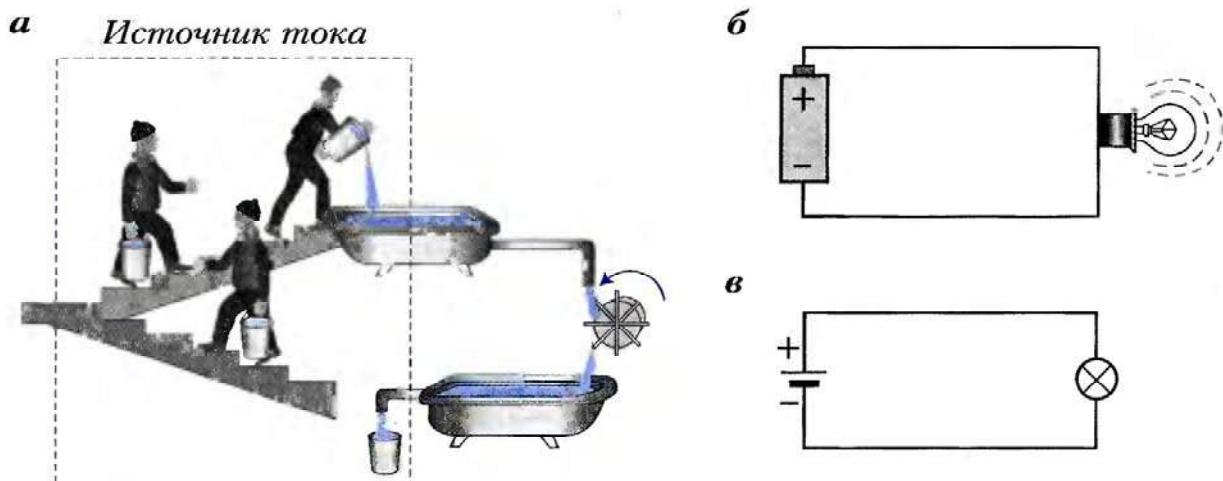


Рис. 87 Электрический ток в проводнике совершает работу (лампочка светится) за счёт работы сторонних сил в источнике тока

Электрическое поле в проводнике обусловлено электрическим напряжением между его концами. Таким образом, напряжение между концами проводника, по которому течёт электрический ток, играет ту же роль, что и разность высот в ручье.

Вернёмся к ручью на рис. 87, а. Для того чтобы ручей *действовал постоянно*, необходимо восполнять убывающую в верхнем сосуде воду, забирая её из нижнего. При этом, как вы понимаете, для подъёма воды необходимо совершать работу против сил тяжести. Следовательно, чтобы ручей тек постоянно, необходимо устройство, которое совершает работу против силы тяжести по переносу воды из нижнего сосуда в верхний. На рисунке этим занимаются люди, переносящие воду в вёдрах. Таким образом, вода в ручье течёт и совершает работу (вращает мельницу) за счёт работы людей.

Понятно, что схожее устройство необходимо и для поддержания постоянного электрического тока через лампочку (см. рис. 87, б). Действительно, заряды, движущиеся под действием электрического поля в проводнике от одного его конца к другому, также должны восполняться на одном конце и забираться с другого. При этом некоторые силы должны совершать работу по переносу зарядов против сил электрического поля. Эти силы часто называют *сторонними силами*.

Работа сторонних сил по переносу электрических зарядов осуществляется в специальных устройствах – *источниках тока*. Как они действуют, вы узнаете позже. Сейчас важно понять, почему их наличие необходимо для поддержания постоянного электрического тока. Ведь именно сторон-

ние силы внутри источника тока перемещают заряды, действуя против сил электрического поля. Работа этих сил создаёт напряжение между выводами источника тока.



Электрический ток существует и совершают работу (лампочка светится) за счёт работы сторонних сил в источнике тока.

Каждый из вас многократно встречался с источниками тока в повседневной жизни. Батарейка для карманного фонарика, автомобильный аккумулятор — всё это источники тока.

Каждый источник постоянного тока имеет два вывода (полюса), которые принято обозначать знаками «+» и «-». На полюсе, обозначенном знаком «+», имеется избыток положительных зарядов. Поэтому его называют положительным полюсом. На полюсе со знаком «-» имеется избыток отрицательных зарядов. Его, соответственно, называют отрицательным полюсом. Источник тока (батарейка) с обозначенными полюсами изображён на рис. 87, б.

Если соединить проводником разноимённые полюсы источника, то в проводнике возникнет электрическое поле. Свободные носители заряда под действием сил этого поля придут в движение. Носители положительного заряда будут двигаться вдоль проводника от положительного полюса источника тока к отрицательному (от «+» к «-»). Носители отрицательного заряда будут двигаться в противоположном направлении: от «-» к «+».

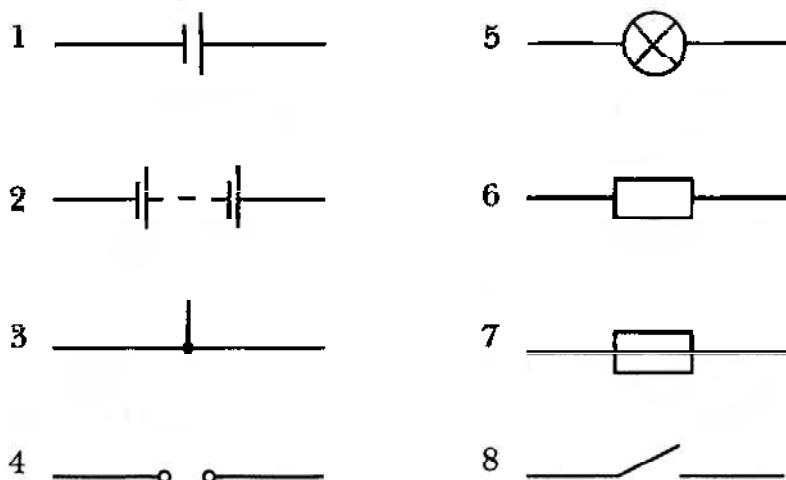


Рис. 88

Условные обозначения элементов электрических цепей: 1 — источник тока; гальванический элемент или аккумулятор; 2 — батарея элементов или аккумуляторов; 3 — соединение проводов; 4 — зажимы для подключения приборов; 5 — электрическая лампа; 6 — резистор; 7 — плавкий предохранитель; 8 — ключ

Источник тока и проводник, соединяющий его полюсы, образуют **электрическую цепь**. Например, изображённая на рис. 87, в электрическая цепь состоит из источника тока и проводников: нити накала лампочки и проводов, соединяющих лампочку с источником.

Для схематического изображения электрических цепей используют специальные условные обозначения. Некоторые из них приведены на рис. 88.

Итоги

Упорядоченное движение заряженных частиц называют электрическим током.

Для создания электрического тока необходимо выполнение двух условий: во-первых, наличие свободных носителей заряда; во-вторых, наличие силы, постоянно действующей на эти свободные носители заряда.

Электрическое поле в проводнике существует, если между его концами есть электрическое напряжение. Для поддержания постоянного электрического тока в проводнике необходимо устройство, создающее это напряжение. Оно восполняет убыль зарядов на одном конце проводника и забирает их избыток с другого. Такое устройство называют источником тока.

Источник постоянного тока имеет два вывода, которые обозначают знаками «+» и «-». На полюсе со знаком «+» имеется избыток положительных зарядов. Его называют положительным полюсом. На полюсе, обозначенном знаком «-», имеется избыток отрицательных зарядов. Его называют отрицательным полюсом.

Силы, совершающие работу по переносу зарядов в источнике тока, называют сторонними силами.

Источник тока и проводники, соединяющие его полюсы, образуют электрическую цепь.

Электрический ток совершает работу в цепи за счёт работы сторонних сил в источнике тока.

Вопросы

1. Какое движение заряженных частиц называют электрическим током?
2. Выполнение каких условий необходимо для существования электрического тока?

- 3** Что называют источником тока?
- 4** Как называют силы, совершающие работу по переносу зарядов против электрических сил в источнике тока?
- 5** Как называют полюсы источника тока? Почему?
- 6** За счёт работы каких сил электрический ток в проводнике цепи совершает работу?
- 7** Из каких элементов может состоять электрическая цепь?

Упражнения

- 1** Приведите примеры известных вам электрических цепей. Укажите в них источник тока, проводник, другие элементы цепи.
- 2** Начертите схему электрической цепи, состоящей из батарейки, ключа, лампочки и соединительных проводов.
- 3** Возьмите несколько электрических устройств, работающих от батареек (например, электрический фонарик, радиоприёмник и т. п.), изучите схемы подключения батареек в этих приборах, зарисуйте эти схемы и отметьте на них положительные и отрицательные полюсы источников тока.

§ 44

Электрический ток в металлах

Наиболее часто проводники изготавливают из металлов. Поэтому вначале мы изучим природу электрического тока в металлах.

В твёрдом состоянии металлы являются кристаллическими веществами. В узлах кристаллической решётки расположены положительные ионы, которые совершают хаотические колебания около положений равновесия. Напротив, оторвавшиеся от этих ионов свободные электроны подобно молекулам газа хаотически движутся, перемещаясь по всему объёму проводника (см. рис. 70).

После создания в проводнике электрического поля «закреплённые» в узлах кристаллической решётки положительные ионы остаются на своих местах. Иначе ведут себя свободные электроны. Под действием сил электрического поля «электронный газ» как единое целое движется в сторону, противоположную направлению напряжённости созданного электрического поля (так как заряды электронов отрицательны). В результате в проводнике имеется упорядоченное движение свободных электронов — электрический ток.



Электрический ток в металлических проводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов под действием созданного в металле электрического поля.

Отметим, что при создании в металле электрического поля свободные электроны не прекращают своего хаотического движения. Однако в результате действия этого поля, наряду с хаотическим движением, у электронов появляется **ещё и упорядоченное движение**. Такое движение электронов можно сравнить с движением молекул воздуха при ветре, когда, наряду с хаотическим (тепловым) движением, молекулы воздуха совершают **упорядоченное движение**.

Эксперименты показывают, что скорость упорядоченного движения свободных электронов в металле под действием электрического поля при обычных токах составляет единицы миллиметров в секунду. При этом если поле постоянно, то и скорость упорядоченного движения электронов не изменяется.

На первый взгляд это представляется странным. Казалось бы, под действием сил электрического поля свободные электроны должны разгоняться, постоянно увеличивая скорость своего движения. Однако этого не происходит. Почему?

Чтобы ответить на этот вопрос, вернёмся к примеру с движением воды в ручье. При постоянной разности высот между истоком и устьем ручья (что соответствует постоянному напряжению источника тока) скорость движения воды неизменна — вода не разгоняется, хотя на ней всё время действует сила тяжести. В чём причина? Это связано с трением движущейся воды ручья о его дно и берега. Силы трения уравновешивают действие силы тяжести. Подобным образом ведут себя и свободные электроны в проводнике. Взаимодействие с положительными ионами, «закреплёнными» в узлах кристаллической решётки, уравновешивает действие силы электрического поля. После возникновения в проводнике электрического поля свободные электроны в течение некоторого времени ускоряются, после чего движутся с установившейся в среднем постоянной скоростью.

После подключения проводника к источнику тока электрическое поле распространяется по всей его длине со скоростью, близкой к скорости света в вакууме, — 300 000 км/с. Это очень большая скорость. Поэтому упорядоченное движение свободных электронов во всех точках такого проводника начинается практически одновременно.

Очень часто эту скорость распространения электрического поля в проводнике путают со скоростью упорядоченного движения свободных носителей заряда. Чтобы понять, в чём заключается отличие, можно сравнить распространение электрического поля с передачей давления во-

ды в заполненной водопроводной трубе, а протекание электрического тока – с движением воды в этой трубе. В заполненной водой трубе увеличение давления на одном из её концов очень быстро передаётся по всей трубе. Точно так же и электрическое поле очень быстро распространяется по всей длине проводника. При этом скорость упорядоченного движения частиц воды в трубе, как и скорость упорядоченного движения свободных носителей заряда в проводнике, может быть небольшой.

Итоги

Электрический ток в металлических проводниках представляет собой упорядоченное движение свободных электронов под действием созданного в металле электрического поля.

Скорость упорядоченного движения свободных электронов в металле под действием электрического поля при обычных токах составляет единицы миллиметров в секунду, при этом если поле постоянно, то и скорость упорядоченного движения электронов не изменяется. Эта скорость обусловлена взаимодействием свободных электронов с положительно заряженными ионами кристаллической решётки металла.

После подключения проводника к источнику тока электрическое поле распространяется по всей длине проводника со скоростью, близкой к скорости света в вакууме (300 000 км/с). В результате упорядоченное движение свободных электронов во всех точках проводника начинается практически одновременно.

Вопросы

1. Что представляет собой электрический ток в металлических проводниках?
2. С какой скоростью упорядоченно движутся свободные электроны в металле под действием электрического поля при обычных токах?
3. Почему скорость упорядоченного движения свободных электронов в проводнике при постоянном электрическом поле не изменяется?
4. Что уравновешивает действие силы электрического поля на свободные электроны при протекании постоянного тока в проводнике?

5 С какой скоростью распространяется электрическое поле в проводнике?

§ 45

Направление электрического тока. Сила тока

Как охарактеризовать электрический ток в проводнике? Для того чтобы ответить на этот вопрос, вспомним, что ток в проводнике представляет собой упорядоченное движение заряженных частиц. Поэтому для его описания надо использовать характеристики такого движения.

! Упорядоченное движение заряженных частиц можно охарактеризовать, во-первых, направлением, во-вторых, интенсивностью.

Рассмотрим эти характеристики по отдельности.

Какое направление принять за направление электрического тока?

Если бы мы задали подобный вопрос в отношении потока воды в ручье, то ответ был бы однозначным. За положительное направление, очевидно, следует принять направление упорядоченного движения молекул воды. В случае с электрическим током ответ получить сложнее. Действительно, в электрическом поле возможно движение зарядов разных знаков: положительных и отрицательных. Так, в металлических проводниках электрический ток обусловлен движением электронов. Они обладают отрицательным зарядом и поэтому упорядоченно движутся в направлении, противоположном направлению напряжённости электрического поля. Если бы в каком-то другом проводнике в электрическом поле оказались свободные носители положительных зарядов, то они упорядоченно двигались бы в противоположном направлении. В некоторых проводниках, например в растворах кислот, солей или щелочей, электрический ток представляет собой движение ионов обоих знаков. Какое же направление принять за направление электрического тока?

Вопрос о направлении тока возник задолго до открытия электронов и ионов. Некоторое время считали, что электрический ток во всех проводниках обусловлен перемещением зарядов обоих знаков в противоположных направлениях. Поэтому *условно за направление электрического тока было принято направление, в котором должны были бы упорядоченно двигаться положительные заряды*.

! В соответствии с этим правилом считают, что в подсоединенном к источнику тока проводнике ток направлен от положительного полюса источника к отрицательному.

Все правила и законы для электрического тока, полученные уже впоследствии, были сформулированы для направления тока, выбранного таким образом. Поэтому во избежание путаницы это правило сохранено до сих пор и учитывается при формулировках всех найденных закономерностей. Как вы понимаете, в наиболее распространённых металлических проводниках это направление тока противоположно направлению реального упорядоченного движения свободных носителей зарядов — электронов. Тем не менее это ни у кого не вызывает затруднений.

А как охарактеризовать быстроту переноса заряда — интенсивность электрического тока в проводнике?

Если бы мы задали подобный вопрос в отношении горного ручья, то ответ был бы прост. Эту интенсивность можно оценивать количеством воды, протекающей через поперечное сечение ручья за единицу времени, например за 1 с.

Похожим образом характеризуют и электрический ток в проводнике. Для характеристики его интенсивности вводят специальную физическую величину — *силу тока*, которую обозначают латинской буквой I .

Силой тока I называют физическую величину, равную отношению электрического заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника за время t , к этому времени:

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

Единица силы тока в СИ — *ампер* (А). Эта единица получила своё название в честь французского физика Андре Ампера (1775–1836), который ввёл понятие «электрический ток». 

Единица силы тока является одной из основных единиц СИ и определяется по силе магнитного взаимодействия двух проводников с током. Поглубнее об этом вы узнаете в следующей главе (см. главу 8).



Исходя из единиц силы тока и времени, в СИ определяют уже знакомую вам единицу заряда — *кулон* (Кл).

Один кулон — это такой заряд, который протекает через поперечное сечение проводника за одну секунду при неизменной силе тока в нём, равной одному амперу:

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



На практике часто используют такие единицы силы тока, как миллиампер (mA) и микроампер (мкA): $1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ А}$; $1 \text{ мкA} = 10^{-6} \text{ А}$. Сила тока 1 А — довольно большая величина. Например, в лампе накаливания сила тока составляет примерно 400 мА.

Если сила тока с течением времени не изменяется, то такой ток называют **постоянным.**

При протекании по проводнику постоянного тока сила тока в любом поперечном сечении проводника будет одинаковой. Действительно, рассмотрим участок проводника между двумя его поперечными сечениями. Электрический заряд, втекающий в этот участок за некоторое время с одной стороны, должен быть равен заряду, вытекающему с другой стороны за то же время. Иначе общий заряд рассмотренного участка проводника изменялся бы с течением времени, а эксперименты показывают, что этого не происходит.



Протекание электрического тока сопровождается целым рядом явлений. Различают **тепловое, химическое, магнитное и другие действия тока**.

Рассмотрим некоторые из этих явлений. Тепловое действие тока проявляется в нагревании проводника. Наглядным примером этого действия является нагревание тонкой вольфрамовой проволочки (**нити накала**) в электрических лампах. При протекании тока температура нити возрастает до столь высоких значений, что нить начинает светиться (рис. 89). На тепловом действии тока основана работа всех электрических нагревательных приборов: электрических чайников, электрических нагревателей воздуха, паяльников и др.

Химическое действие тока проявляется, например, при его протекании через растворы кислот, щелочей или солей (см. рис. 89). В этом случае на опущенных в такие растворы положительном и отрицательном электродах в результате химических реакций выделяются различные химические вещества. На отрицательном электроде выделяются вещества, ионы которых имеют положительный заряд, а на положительном электроде, наоборот, выделяются вещества, ионы кото-

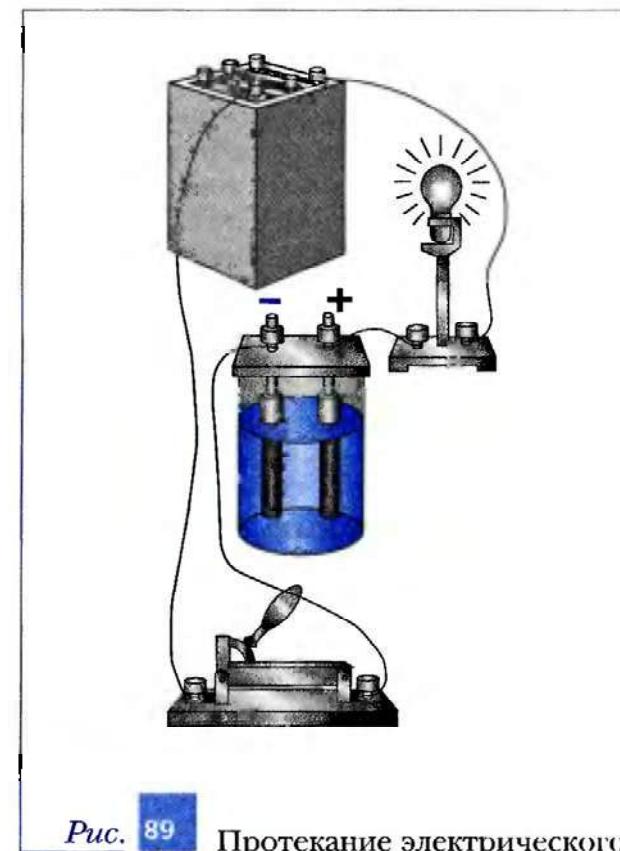


Рис. 89

Протекание электрического тока через растворы кислот, солей или щелочей приводит к выделению на электродах различных веществ

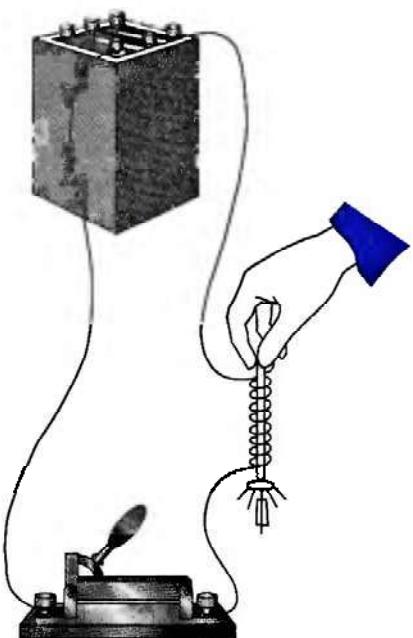


Рис. 90

Гвоздь, на который намотан изолированный проводник с током, притягивает к себе железные предметы

рых имеют отрицательный заряд. На этом явлении основаны технологические процессы, связанные с покрытием поверхностей разных деталей тонкими слоями металлов (серебрение, золочение и т. п.).

Проводники, по которым течёт электрический ток, всегда проявляют свойства, присущие магнитам. Так, если проводник с током, покрытый изоляционным материалом, намотать на железный гвоздь, то этот гвоздь будет притягивать к себе железные предметы (рис. 90). Магнитное действие тока проявляется и при поднесении к проводнику с током компаса. Магнитная стрелка компаса будет стремиться сориентироваться перпендикулярно этому проводнику.

На различных действиях тока основана работа многих электроизмерительных приборов.

Итоги

За направление тока принято направление, в котором упорядоченно движутся положительные заряды.

Силой тока I называют физическую величину, равную отношению электрического заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника за время t , к этому времени:

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

Единица силы тока в СИ – ампер (А).

Ампер является одной из основных единиц в СИ и определяется по силе магнитного взаимодействия двух проводников с током.

Используя единицы силы тока и времени, в СИ определяют единицу заряда – кулон (Кл).

Один кулон — это заряд, который протекает через поперечное сечение проводника за одну секунду при неизменной силе тока в нём, равной одному амперу: $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

Если сила тока с течением времени не изменяется, то такой ток называют постоянным.

Действием электрического тока называют явления, которыми сопровождается его протекание.

Вопросы

- 1** Как характеризуют упорядоченное движение электрических зарядов?
- 2** Какое направление принято за направление тока?
- 3** Что называют силой тока?
- 4** Как определяют единицу заряда в СИ?
- 5** Какой ток называют постоянным?
- 6** В каком направлении в проводнике, подключённом к источнику постоянного тока, течёт ток?
- 7** Какие действия тока вы знаете? Как они проявляются?
- 8** Всегда ли при протекании тока наблюдается его химическое действие?
- 9** На каком действии тока основан процесс покрытия изделий серебром?
- 10** Опишите проявления магнитного действия тока.

Упражнения

- 1** Выразите силу тока 5 кА , 100 мА и 30 мкА в амперах.
- 2** Сила постоянного тока через нить накала лампочки $I = 2 \text{ А}$. Определите электрический заряд, который проходит через поперечное сечение этой нити за $t = 15 \text{ мин}$.
- 3** Оцените количество электронов, проходящих за 10 мин через поперечное сечение нити накала лампочки из задачи 2.
- 4** При запуске автомобильного двигателя через поперечное сечение электрической цепи, в которую включён источник тока (аккумулятор), за время $t = 5 \text{ с}$ протекает заряд $q = 1,5 \text{ кКл}$. Определите силу тока в цепи за это время, считая ток постоянным.

- 5** На изображённых вами электрических схемах (см. упражнения 2, 3 к § 43) поставьте направление тока в проводнике при замыкании данной цепи.

§ 46

Измерение силы тока и напряжения

Силу тока в электрической цепи измеряют при помощи специальных приборов — *амперметров*.

Для измерения силы тока можно использовать различные действия тока. Существуют, например, приборы, основанные на тепловом действии тока, — *тепловые амперметры*. Однако в настоящее время наибольшее распространение получили амперметры, в которых используется магнитное действие электрического тока. С физическими принципами, лежащими в основе их устройства, вы познакомитесь в следующей главе.

Шкала амперметра проградуирована в амперах. На ней принято ставить букву А. Существуют милли- и микроамперметры, рассчитанные на измерение небольших значений силы тока. Их шкалы проградуированы соответственно в милли- и микроамперах. (На шкалах этих приборов ставят буквы мА и μ А.)

Для измерения силы тока в проводнике надо пропустить этот ток через амперметр.



Амперметр включают в цепь в разрыв проводника, для чего концы разъединённого (разорванного) проводника подключают к клеммам амперметра.

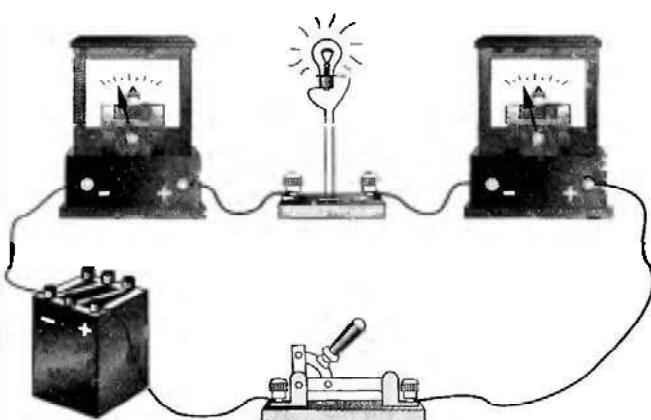


Рис.

91

Оба амперметра показывают одинаковую силу тока

Клемма, обозначенная знаком «+», должна быть соединена с проводом, идущим от положительного полюса источника тока к прибору. Напротив, клемму, обозначенную знаком «-», соединяют с проводом, идущим к отрицательному полюсу источника.

Включение в цепь нового элемента может изменить свойства цепи. Это, в свою очередь, может привести к изменению силы тока в этой цепи. Поэтому одно из основных требований к

амперметру — то, что его включение в цепь не должно существенно изменять силу тока в этой цепи.

Мы уже отмечали, что если в цепи нет разветвлений, то сила постоянного тока во всех поперечных сечениях проводника одинакова. Поэтому *амперметр можно включать в любом месте неразветвленной электрической цепи*. Легко убедиться в том, что если несколько амперметров включить в разные места неразветвленной цепи, то их показания будут одинаковыми (рис. 91).

Отметим, что на электрических схемах амперметр изображают кружком с буквой «A» внутри.

Вы уже знаете, что для поддержания в проводнике постоянного электрического тока необходим источник тока, создающий на концах проводника напряжение.

Для измерения напряжения применяют специальный прибор — *вольтметр*. Устройство многих вольтметров также основано на использовании магнитного действия тока. В отличие от амперметра шкала вольтметра проградуирована в вольтах. На ней принято ставить букву V. Если шкала проградуирована в милли- или микровольтах, то такой прибор называют соответственно милли- или микровольтметром. (На шкалы таких приборов ставят буквы mV или μ V.) Около клемм вольтметра, как и амперметра, ставят знаки «+» и «-».

Для измерения напряжения источника тока клемму вольтметра со знаком «+» подсоединяют к положительному полюсу источника тока, а клемму со знаком «-» — к его отрицательному полюсу (рис. 92).

При наличии электрического тока в цепи между любыми двумя поперечными сечениями этой цепи имеется напряжение, иначе на участке цепи между этими сечениями отсутствовало бы электрическое поле, и заряды на этом участке перестали бы двигаться упорядоченно.



Чтобы измерить напряжение между двумя сечениями электрической цепи, надо подключить к ним клеммы вольтметра при помощи соединительных проводов, не разрывая цепь.

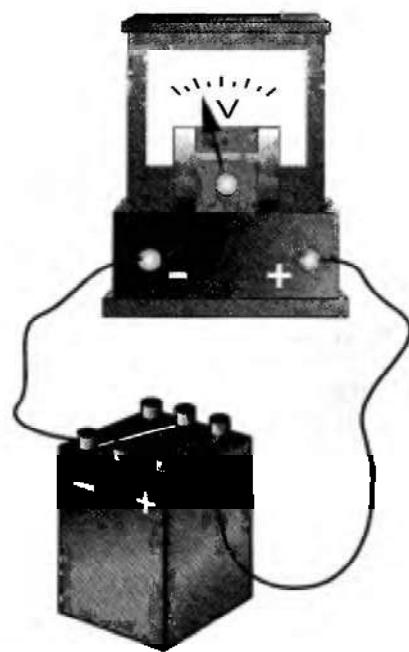


Рис. 92

Подключение вольтметра для измерения напряжения на полюсах источника тока

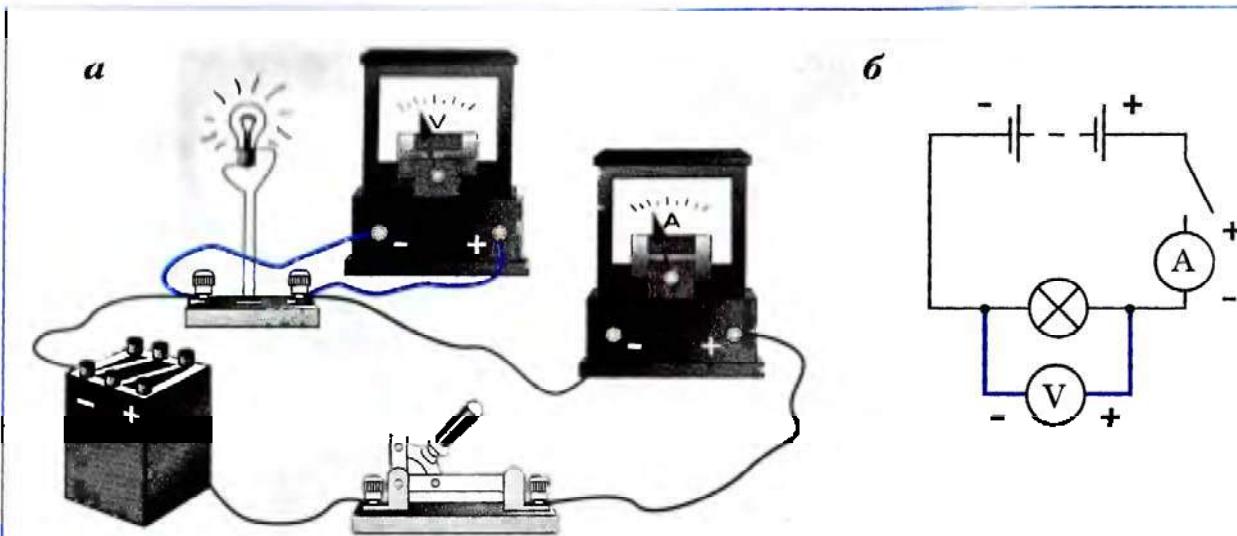


Рис. 93 Схема подключения амперметра и вольтметра для измерения силы тока в цепи и напряжения на зажимах лампы

На рис. 93, *а* показано, как подключается вольтметр для измерения напряжения на зажимах электрической лампочки. Здесь же показано включение амперметра, измеряющего силу тока в этой цепи. Электрическая схема этой цепи с подключёнными вольтметром и амперметром приведена на рис. 93, *б*.

Обратим внимание на различие в подключении этих измерительных приборов. Амперметр включают в разрыв цепи, т. е. последовательно со всеми элементами цепи (батареей источников тока, электрической лампочкой и ключом). Такое включение прибора называют *последовательным*.

Напротив, вольтметр подключают соединительными проводами к тому участку, между концами которого измеряют напряжение. Такое подключение прибора называют *параллельным*.

Это различие в подключении амперметра и вольтметра является принципиальным, так как измеряются разные физические величины.

Итоги

Силу тока в цепи измеряют с помощью специальных приборов — амперметров.

Амперметр включают в разрыв проводника, в котором хотят измерить силу тока. Для этого концы разъединённого (разорванного) проводника подключают к клеммам амперметра.

Такое подключение называют *последовательным*.

Для измерения напряжения применяют вольтметры.

Чтобы измерить напряжение на участке электрической цепи, надо подсоединить клеммы вольтметра к концам этого участка при помощи проводов, не разрывая цепь.

Такое подключение называют *параллельным*.

Вопросы

- 1 Как называют прибор для измерения силы тока?
- 2 В каких единицах проградуированы шкалы амперметра, килоамперметра, миллиамперметра?
- 3 Как включают амперметр в электрическую цепь?
- 4 Будут ли отличаться показания нескольких амперметров, включённых в разные места неразветвлённой электрической цепи?
- 5 Как называют прибор для измерения напряжения?
- 6 В каких единицах может быть проградуирована шкала вольтметра?
- 7 Как подключают вольтметр для измерения напряжения между концами участка электрической цепи?
- 8 Почему вольтметр и амперметр подключают по-разному?

Упражнения

- 1 При последовательном включении амперметра и миллиамперметра в неразветвлённую электрическую цепь стрелка миллиамперметра установилась напротив деления 500. Что покажет амперметр?
- 2 Имеется вольтметр, шкала которого проградуирована от 0 до 30 В, а цена деления шкалы равна 2 В. Можно ли этим прибором измерить напряжение: а) 127 В; б) 200 мВ?
- 3 На рис. 94 показаны электрические схемы подключения амперметров, измеряющих силу тока в одной и той же цепи. Показание амперметра в цепи на рис. 94, а равно 0,2 А. Какую силу тока покажет амперметр на рис. 94, б?

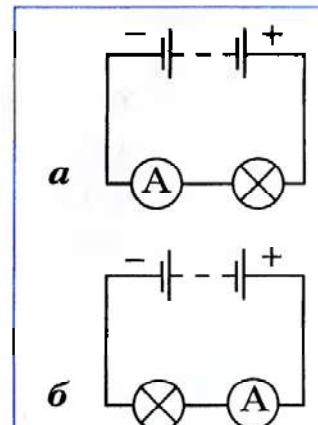


Рис. 94

-  4 | Имеется точный амперметр. Предложите, как с помощью него проградуировать шкалу другого амперметра.

§ 47

Зависимость силы тока от напряжения.

Закон Ома для участка цепи.

Сопротивление проводника

Для работы различных электрических устройств часто требуется изменять силу тока. Чтобы это сделать, надо знать, от чего зависит сила тока в проводнике.

Попробуем разобраться в этом вопросе. Вспомним, в чём причина упорядоченного движения свободных носителей заряда в проводнике. Это движение обусловлено действием на заряды силы электрического поля. Следовательно, *чем больше эта сила, тем больше скорость упорядоченного движения зарядов и, соответственно, сила тока*. Электрическое поле образуется в проводнике в результате создания напряжения между его концами. Чем больше напряжение, тем с большей силой электрическое поле действует на заряды.



Таким образом, сила тока в проводнике зависит от напряжения между его концами.

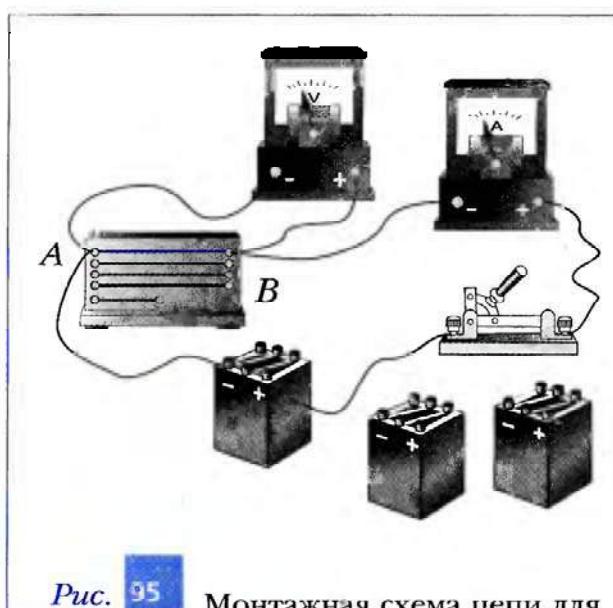


Рис. 95

Монтажная схема цепи для исследования зависимости силы тока от напряжения на проводнике *AB*

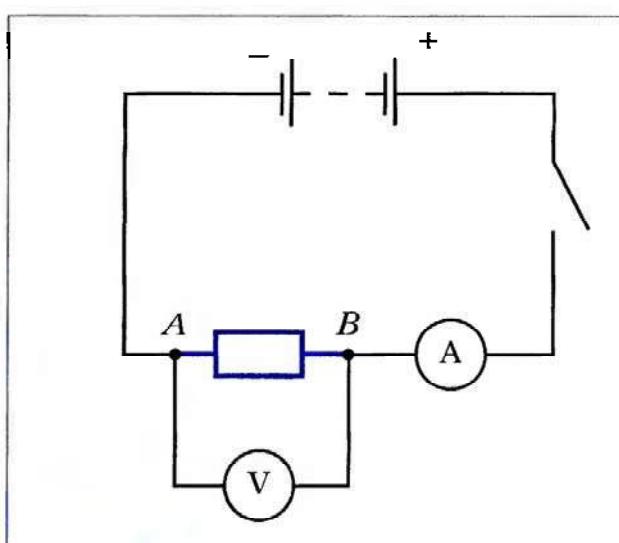


Рис. 96

Электрическая схема цепи для исследования зависимости силы тока от напряжения на проводнике *AB*

Исследуем эту зависимость экспериментально. Для этого воспользуемся установкой, показанной на рис. 95. К источнику тока подключён проводник AB . Последовательно с ним включён амперметр для измерения силы тока в цепи. Напряжение между точками B и A измеряют вольтметром. Электрическая схема установки приведена на рис. 96.

Последовательное подключение в цепь дополнительных источников тока позволяет увеличивать напряжение между точками B и A . Эксперимент показывает, что при этом одновременно увеличивается и сила тока в проводнике AB . При увеличении напряжения в два раза сила тока также увеличивается в два раза. При увеличении напряжения в три раза сила тока также увеличивается в три раза и т. д.

! При увеличении напряжения между точками B и A в некоторое число раз сила тока в проводнике AB увеличивается в такое же число раз.

Полученный экспериментально график зависимости силы тока в проводнике AB от напряжения между его концами показан на рис. 97. Он представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат.

Проводник AB является участком цепи. Поэтому полученное нами соотношение можно сформулировать в следующем виде.

Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению между концами этого участка.

Данное утверждение позволяет ввести физическую величину, характеризующую проводник, — *сопротивление*.

Отношение напряжения U между концами участка цепи (проводника) к силе тока I в нём называют *сопротивлением R этого участка цепи (проводника)*:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Единица сопротивления проводника (участка цепи) в СИ — ом ($1\text{ Ом} = 1\text{ В}/1\text{ А}$).

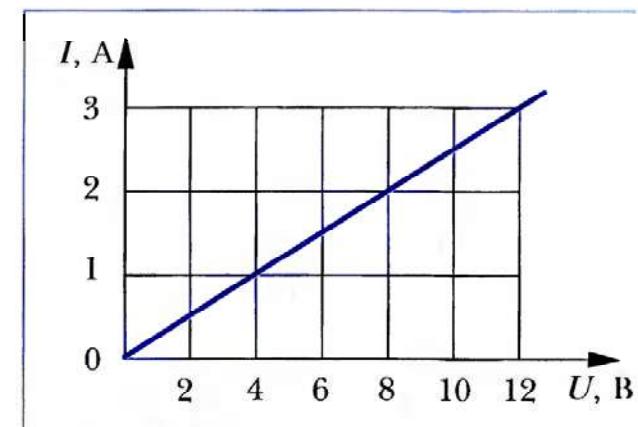


Рис. 97

График зависимости силы тока от напряжения

Сопротивлением 1 Ом обладает проводник, в котором сила тока равна 1 А, если напряжение между его концами равно 1 В.

Данное отношение может быть записано в виде:

$$U = I \cdot R,$$

где U – напряжение между концами участка цепи, I – сила тока в этом участке, R – его сопротивление.

Это соотношение называют *законом Ома для участка цепи* – в честь немецкого учёного Георга Ома (1787–1854).

Чем же объяснить наличие у проводника сопротивления? Почему проводник препятствует (сопротивляется) упорядоченному протеканию по нему свободных носителей заряда (тока)?

Вы уже знаете, что при постоянном напряжении между концами проводника в нём существует постоянное электрическое поле. Силы этого поля действуют на свободные электроны, заставляя их упорядоченно двигаться. Как мы уже отмечали, скорость такого упорядоченного движения постоянна и не изменяется с течением времени. Это связано с тем, что движению свободных электронов препятствует их взаимодействие с положительными ионами, расположенными в узлах кристаллической решётки проводника. Действие ионов компенсирует действие силы электрического поля. Именно поэтому свободные электроны упорядоченно движутся в проводнике с постоянной скоростью, несмотря на действие силы электрического поля.

■ Наличие у проводника сопротивления, т. е. способности препятствовать упорядоченному движению свободных электронов, объясняется их взаимодействием с кристаллической решёткой.

Интенсивность взаимодействия свободных электронов с ионами кристаллической решётки зависит от её строения. Поэтому проводники, изготовленные из разных материалов, обладают различной способностью препятствовать электрическому току. Кроме того, сопротивление проводника зависит от его геометрических характеристик (длины и площади поперечного сечения). В этом легко убедиться экспериментально, исследуя сопротивления проводников разных размеров, изготовленных из разных материалов. На установке, показанной на рис. 95, такие проводники поочерёдно подключают в одну и ту же электрическую цепь, после чего каждый раз измеряют силу тока в проводнике и напряжение между его концами.

Как рассчитать сопротивление проводника, вы узнаете в следующем параграфе. Отметим, что проводник, обладающий сопротивлением, называют *резистором*.

Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению между концами этого участка.

Отношение напряжения U между концами участка цепи (проводника) к силе тока I в нём называют сопротивлением R этого участка цепи (проводника):

$$R = \frac{U}{I}.$$

Единица сопротивления проводника (участка цепи) в СИ – ом (1 Ом = 1 В/1 А).

Сопротивлением 1 Ом обладает проводник, в котором сила тока равна 1 А, если напряжение между концами равно 1 В.

Закон Ома для участка цепи с сопротивлением R может быть записан в виде:

$$U = I \cdot R,$$

где U – напряжение между концами этого участка, I – сила тока, протекающего по этому участку, R – сопротивление участка цепи.

Наличие у проводника сопротивления объясняется взаимодействием упорядоченно движущихся свободных электронов с ионами кристаллической решётки проводника.

Вопросы

- 1 Как изменяется скорость упорядоченного движения зарядов при увеличении напряжённости электрического поля?
- 2 Как изменяется сила электрического поля, действующая на заряды в проводнике, при увеличении напряжения между его концами?
- 3 Как формулируется закон Ома для участка цепи?
- 4 Что называют сопротивлением участка цепи (проводника)?
- 5 Назовите единицу сопротивления в СИ.
- 6 Как изменяется сила тока в проводнике при увеличении его сопротивления, если напряжение между концами проводника постоянно?
- 7 От чего зависит сила тока в проводнике?

- 8 Почему проводник препятствует (сопротивляется) электрическому току?
- 9 Почему проводники, изготовленные из разных материалов, обладают различной способностью препятствовать току?

Упражнения

- При напряжении между концами участка цепи, равном 5 В, сила тока равна 0,8 А. Рассчитайте силу тока в этом участке цепи при увеличении напряжения в четыре раза.
- Определите сопротивление участка цепи, если при напряжении между концами этого участка, равном 5 В, сила тока в нём равна 0,8 А.
- На рис. 98 изображён график зависимости силы тока в участке цепи от сопротивления этого участка. Найдите напряжение между концами этого участка. Является ли оно постоянным?
- Сопротивление участка цепи равно 50 Ом. Напряжение между концами этого участка 10 В. Определите силу тока в этом участке цепи.
- На рис. 99 изображены графики зависимости силы тока от напряжения между концами двух проводников: A и B. Какой из этих проводников обладает большим сопротивлением?

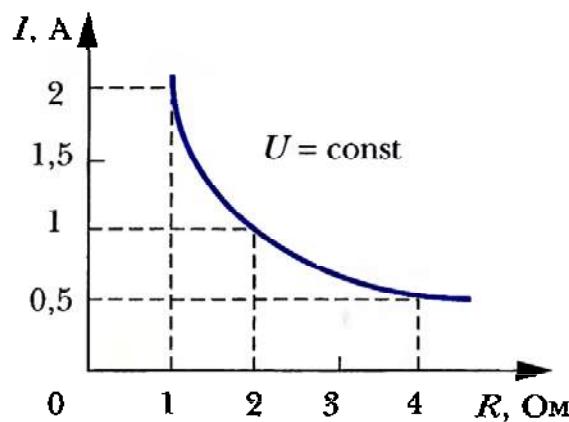


Рис. 98 График зависимости силы тока в проводнике от его сопротивления

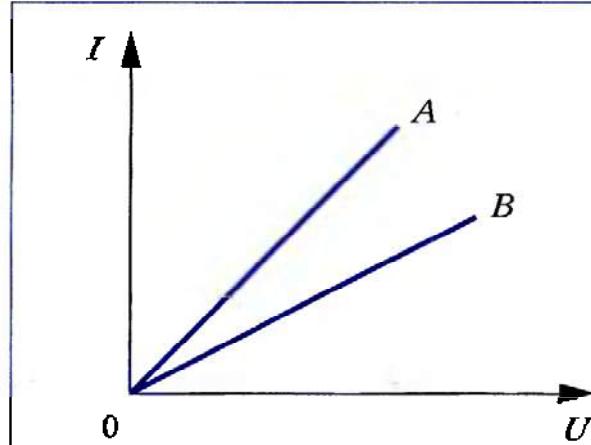


Рис. 99

§ 48 Расчёт сопротивления проводника. Удельное сопротивление вещества

Исследуем экспериментально зависимость сопротивления проводника от его геометрических характеристик (длины, толщины) и материала, из которого он изготовлен. Используем для этого установку, изображённую на рис. 95.

Вначале сравним сопротивления трёх проволок, изготовленных из одного металла, имеющих одинаковую длину, но *разную толщину* (разную площадь поперечного сечения). Для этого будем поочерёдно подключать проволоки в электрическую цепь. Измерение силы протекающего через каждую проволоку тока и напряжения между её концами позволяет определить её сопротивление.

Опыт показывает, что *чем толще проволока, тем меньше её сопротивление*. Причём увеличение площади поперечного сечения проволоки в некоторое число раз приводит к уменьшению её сопротивления в такое же число раз.

! Сопротивление проволоки обратно пропорционально площади её поперечного сечения.

Это соотношение между толщиной проволоки и её сопротивлением легко понять, если сравнить электрический ток в проводнике с течением воды по трубе. Представим себе воду, текущую по трубам разной толщины (рис. 100). Понятно, что чем толще труба, т. е. чем больше её поперечное сечение, тем быстрее по ней течёт вода из верхнего сосуда в нижний.

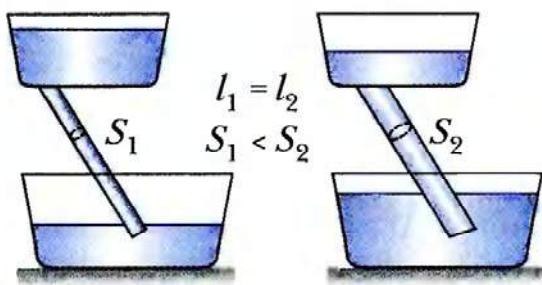


Рис. 100 Чем больше площадь поперечного сечения проводника воды (трубы), тем меньше её сопротивление

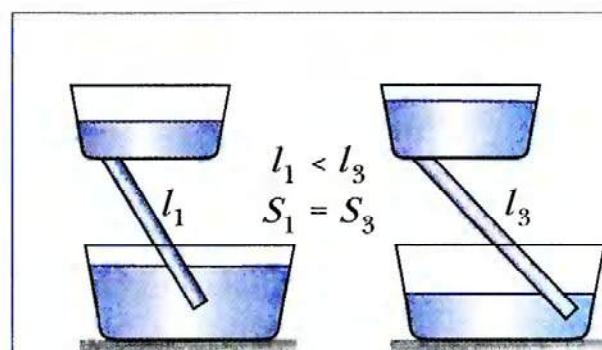


Рис. 101 Чем меньше длина проводника воды (трубы), тем меньше её сопротивление

Теперь сравним сопротивления проволок из одного материала, имеющих одинаковую толщину, но *разную длину*. Результаты измерений показывают, что чем длиннее проволока, тем больше её сопротивление. При этом *сопротивление проволоки прямо пропорционально её длине*.

Такую связь между длиной проволоки и её сопротивлением также легко понять, если опять же сравнить ток в проводнике с течением воды по трубе. Представим себе воду, текущую по трубам разной длины (рис. 101). Ясно, что чем короче труба, тем меньше силы трения, действующие на протекающую воду. Поэтому по короткой трубе вода будет перетекать в нижний сосуд быстрее, чем по длинной.

Таким образом, проведённые эксперименты позволяют сделать вывод.

! Сопротивление R проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади S его поперечного сечения. Следовательно, сопротивление R прямо пропорционально отношению $\frac{l}{S}$.

Мы уже отмечали, что сопротивление проводника зависит от строения его кристаллической решётки. Поэтому коэффициент пропорциональности между сопротивлением R и отношением $\frac{l}{S}$ зависит от вещества, из которого изготовлен проводник. Этот коэффициент называют *удельным электрическим сопротивлением* вещества.

Удельным сопротивлением ρ вещества называют отношение сопротивления R проводника из этого вещества к величине $\frac{l}{S}$:

$$\rho = \frac{R}{\frac{l}{S}} = \frac{R \cdot S}{l}.$$

Таким образом, если известны длина и площадь поперечного сечения проводника, а также удельное сопротивление вещества, из которого он изготовлен, то сопротивление R этого проводника равно:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

! Удельное сопротивление вещества в СИ численно равно сопротивлению проводника из этого вещества, имеющего длину 1 м и площадь поперечного сечения 1 м².

Единица удельного сопротивления в СИ – $\frac{\text{Ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = \text{Ом} \cdot \text{м}$.

На практике площадь поперечного сечения проводника обычно измеряют в квадратных миллиметрах. В этом случае единица удельного сопротивления: $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Отметим, что удельное сопротивление веществ зависит от температуры. Например, у металлов с повышением температуры удельное сопротивление возрастает.

Значения удельных сопротивлений некоторых веществ при $t = 20^\circ\text{C}$ приведены в таблице 10.

Таблица 10

Вещество	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Серебро	0,016
Медь	0,017
Золото	0,024
Алюминий	0,028
Вольфрам	0,055
Железо	0,10
Свинец	0,21
Никелин (сплав)	0,43

Вещество	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$
Манганин (сплав)	0,44
Константан (сплав)	0,50
Ртуть	0,96
Нихром (сплав)	1,1
Фехраль (сплав)	1,3
Графит	8–20
Фарфор	10^{12}
Янтарь	10^{16}

Зависимость сопротивления проводника от его длины используют в специальных приборах — *реостатах* для регулирования силы тока в цепи. Реостатом называют прибор, сопротивление которого можно изменять. Его включают последовательно в цепь. Увеличение сопротивления реостата приводит к уменьшению силы тока в цепи и наоборот.

Простейший реостат представляет собой проволоку из материала с большим удельным сопротивлением, намотанную, например, на керамический цилиндр (рис. 102, а). Проволока покрыта тонким, не проводящим ток (изолирующим) слоем. Этот слой изолирует соседние витки обмотки

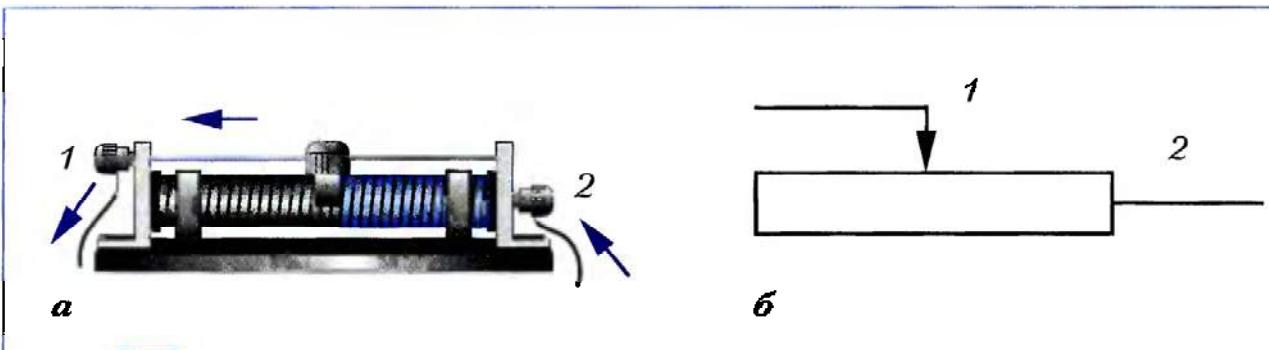


Рис. 102

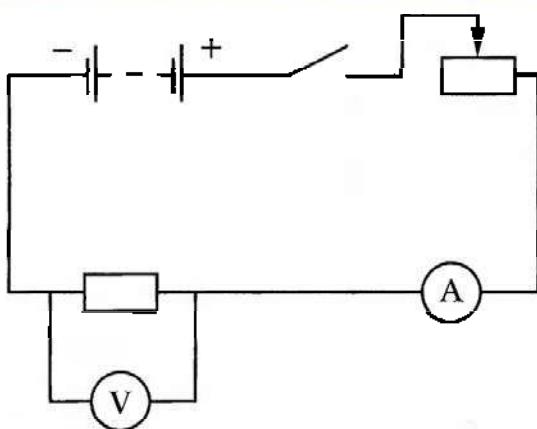
Ползунковый реостат (а) и его условное обозначение на электрических схемах (б)

друг от друга. Над обмоткой расположен металлический стержень, по которому может перемещаться ползунок. Металлические контакты ползунка плотно прижимаются к обмотке. В местах касания контактов ползунка с обмоткой её изолирующий слой стёрт. Перемещение ползунка приводит к тому, что число витков обмотки, включённых в цепь, изменяется. Если оно увеличивается, то тем самым увеличивается длина проволоки 1–2, по которой течёт ток. В результате увеличивается и сопротивление реостата. Поэтому в цепи с реостатом уменьшается сила тока. При уменьшении числа витков реостата, включённых в цепь, его сопротивление, напротив, уменьшается. В результате сила тока в такой цепи увеличивается.

Сила тока через реостат не должна превышать наибольшее допустимое для него значение. В противном случае реостат может выйти из строя (перегореть). Предельное значение допустимой силы тока указывается на реостате. Условное обозначение реостата в электрических схемах приведено на рис. 102, б. Пример электрической схемы с реостатом показан на рис. 103.

Рис. 103

Электрическая схема с включённым в цепь реостатом



Итоги

Сопротивление R проводника прямо пропорционально его длине l и обратно пропорционально площади S его поперечного сечения.

Удельным сопротивлением ρ вещества называют отношение сопротивления R проводника из этого вещества к величине $\frac{l}{S}$:

$$\rho = \frac{R}{\frac{l}{S}} = \frac{R \cdot S}{l}.$$

Если известны длина и площадь поперечного сечения проводника, а также удельное сопротивление вещества, из которого он изготовлен, то сопротивление R этого проводника равно:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}.$$

Единица удельного сопротивления в СИ – Ом · м (ом-метр).

На практике площадь поперечного сечения проводника измеряют в квадратных миллиметрах. В этом случае единица удельного сопротивления: $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Вопросы

- 1 Как изменяется сопротивление проволоки при увеличении (уменьшении) площади её поперечного сечения?
- 2 Как изменяется сопротивление проволоки при увеличении (уменьшении) её длины?
- 3 Как связано сопротивление проволоки с её длиной и площадью поперечного сечения?
- 4 Что называют удельным сопротивлением вещества?
- 5 Как можно вычислить сопротивление проводника, если известны его длина и площадь поперечного сечения, а также удельное сопротивление вещества, из которого он изготовлен?
- 6 В каких единицах измеряют удельное сопротивление?
- 7 Как устроен реостат?

Упражнения

- 1 Какие из известных вам веществ обладают большим, а какие — малым удельным сопротивлением?
- 2 Используя таблицу 10, определите удельное сопротивление серебра в единицах СИ.

- 3** Длина провода равна 5 м, а площадь его поперечного сечения равна 2 мм^2 . Определите сопротивление такого провода, если он изготовлен: а) из алюминия; б) из свинца; в) из никрома; г) из меди.
- 4** Во сколько раз изменится сила тока в проводе, подключённом к источнику тока, если его длину увеличить в три раза, а площадь поперечного сечения уменьшить в два раза? Считайте, что при этом напряжение между концами провода остаётся неизменным.
- 5** В зрительном зале театра перед началом спектакля медленно гаснет свет. Увеличивается или уменьшается при этом сопротивление используемого реостата, включённого последовательно в осветительную сеть зала?

§ 49

Последовательное соединение проводников

Как правило, электрические цепи, используемые на практике, состоят из нескольких проводников (приборов, устройств, соединительных проводов и т. п.). Эти проводники в зависимости от поставленной задачи соединяют по-разному. Если известно сопротивление каждого из проводников и способ их соединения, то можно рассчитать общее сопротивление цепи. Рассмотрим, как это можно сделать.

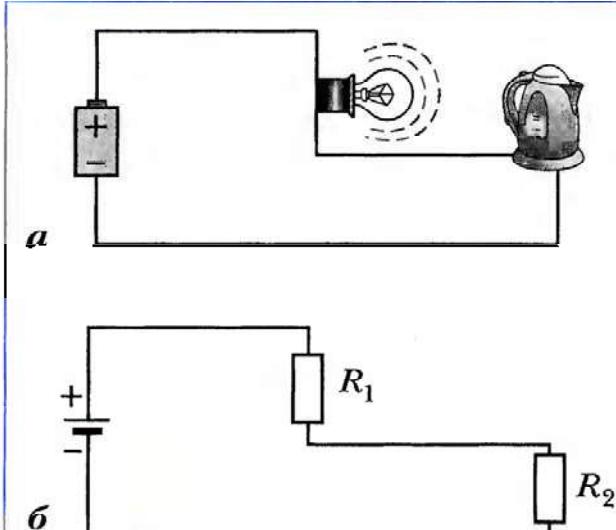


Рис. 104

Схема последовательного соединения проводников:
а – монтажная;
б – электрическая

Начнём с последовательного соединения проводников. В этом случае все устройства в цепи соединяются одно за другим – последовательно, как, например, соединены лампочка и электрочайник на рис. 104, а. Электрическая схема этой цепи приведена на рис. 104, б.

Сразу отметим, что сопротивление соединительных проводов обычно считают малым, и поэтому им пренебрегают.

Чтобы лучше понять физические процессы в такой цепи, рассмотрим уже знакомый нам искусственно созданный ручей (рис. 105).

Вода, перетекая из верхнего сосуда в средний, совершает за неко-

торое время t положительную работу A_1 по раскручиванию верхней мельницы. Перетекая из среднего сосуда в нижний, она за то же время t совершает положительную работу A_2 по раскручиванию нижней мельницы. Общая работа A , совершаемая водой за время t , равна сумме работ: $A = A_1 + A_2$. Потери энергии в системе восполняются работой группы людей, таскающих воду снизу вверх. Заметим, что количества воды, протекающей через все возможные поперечные сечения искусственного ручья, равны между собой. Другими словами, вода нигде не скапливается: её количество ни в одном из сосудов не увеличивается и не уменьшается с течением времени.

Теперь вернёмся к электрической цепи на рис. 104. Электрическое поле, перемещая по последовательно соединённым проводникам свободные носители зарядов, совершает за время t положительную работу A_1 в нити накала электрической лампочки и положительную работу A_2 в спирали электрического чайника. Общая работа A электрического поля по переносу свободных носителей заряда за то же время равна сумме работ: $A = A_1 + A_2$. Потери энергии в системе восполняются источником тока.

Обозначим напряжение между зажимами электрической лампочки U_1 , напряжение между клеммами электрочайника — U_2 , а общее напряжение между полюсами батареи — U .

Пусть q — заряд, который протёк по электрической цепи за время t . В соответствии с определением напряжения:

$$U_1 = \frac{A_1}{q}, \quad U_2 = \frac{A_2}{q}, \quad \text{а} \quad U = \frac{A}{q}.$$

Поскольку $A = A_1 + A_2$, то и $U = U_1 + U_2$.

Полученное соотношение иногда называют законом сложения напряжений при последовательном соединении проводников.

! Общее напряжение при последовательном соединении проводников равно сумме напряжений на этих проводниках:

$$U = U_1 + U_2.$$

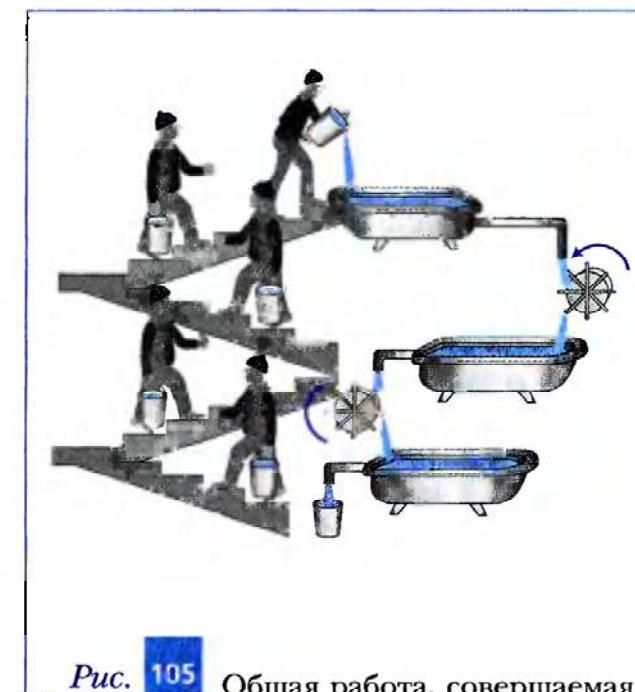


Рис. 105

Общая работа, совершаемая водой, равна сумме работ на отдельных участках:

$$A = A_1 + A_2$$

При последовательном включении проводников сила тока через все поперечные сечения проводников одна и та же. Другими словами, сила тока I_1 через электрическую лампочку с сопротивлением R_1 равна силе тока I_2 через электрочайник с сопротивлением R_2 :

$$I_1 = I_2 = I.$$

Поэтому по закону Ома для участка цепи $U_1 = I \cdot R_1$, $U_2 = I \cdot R_2$.

Пусть общее сопротивление всего участка цепи в правой части схемы (рис. 104, б) равно R . Тогда по закону Ома $U = I \cdot R$. Поскольку $U = U_1 + U_2$, то $I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2$. Следовательно, $R = R_1 + R_2$.

! Таким образом, общее сопротивление цепи при последовательном соединении её проводников равно сумме сопротивлений этих проводников:

$$R = R_1 + R_2.$$

Задача. Два проводника последовательно соединены в цепь (см. рис. 104, б). Сопротивление первого проводника $R_1 = 5$ Ом, сопротивление второго $R_2 = 15$ Ом. Сила тока в цепи равна 0,1 А. Определите: 1) общее сопротивление R этой цепи; 2) общее напряжение между крайними точками этой цепи.

Решение.

Воспользуемся законами последовательного соединения проводников.

1) Общее сопротивление всей цепи $R = R_1 + R_2 = 5 + 15 = 20$ (Ом).

2) Общее напряжение $U = I \cdot R = U_1 + U_2 = 0,1 \cdot 5 + 0,1 \cdot 15 = 2$ (В).

Ответ: $R = 20$ Ом, $U = 2$ В.

Итоги

Законы последовательного соединения проводников.

Общее напряжение при последовательном соединении проводников равно сумме напряжений на этих проводниках:

$$U = U_1 + U_2.$$

При последовательном включении проводников сила тока через все их поперечные сечения одна и та же:

$$I_1 = I_2 = I.$$

Общее сопротивление цепи при последовательном соединении её проводников равно сумме сопротивлений этих проводников:

$$R = R_1 + R_2.$$

Вопросы

- 1 Какое соединение проводников называют последовательным?
- 2 Чему равно общее напряжение между концами цепи при последовательном соединении проводников?
- 3 Почему при последовательном включении проводников сила тока через все их поперечные сечения одна и та же?
- 4 Чему равно общее сопротивление цепи при последовательном соединении проводников?
- * 5 Как с точки зрения законов последовательного соединения проводников объяснить зависимость сопротивления проволоки постоянной толщины от её длины?
- * 6 Почему с точки зрения законов последовательного соединения проводников амперметр включают в цепь последовательно?
- * 7 Каким должно быть сопротивление амперметра по сравнению с сопротивлением всей цепи, чтобы его включение в цепь не приводило к существенному изменению измеряемой силы тока?

Упражнения

- 1 Два проводника, сопротивления которых равны 5 и 20 кОм, последовательно подключены к источнику тока, напряжение между полюсами которого равно 50 В. Определите силу тока в цепи.
- 2 Две одинаковые электрические лампочки подключены последовательно к источнику тока. Напряжение между полюсами источника равно 220 В. Каким будет напряжение на каждой из лампочек?
- 3 К источнику тока последовательно подключены два провода — медный и алюминиевый. Провода имеют одинаковое поперечное сечение 2 мм^2 и одинаковую длину 10 м каждый. Напряжение между полюсами источника тока равно 0,9 мВ. Определите общее сопротивление проводников и напряжение на каждом из них.
- 4 Как изменится ответ в задаче 3, если длину медного провода уменьшить в два раза? Если поперечное сечение алюминиевого провода уменьшить в два раза?

§ 50 Параллельное соединение проводников

Рассмотрим теперь параллельное соединение проводников.

Пример такого соединения (электрочайника и лампочки) приведён на рис. 106, а. Оба устройства одной своей клеммой (зажимом) подсоединены к положительному полюсу источника тока, а другой своей клеммой – к отрицательному полюсу источника. Таким образом, при параллельном соединении нескольких проводников все они одним своим концом подсоединяются к одной клемме электрической цепи, а вторым концом – к другой клемме цепи (рис. 106, б).

Чтобы лучше разобраться в процессах, протекающих в цепи с параллельным соединением проводников, рассмотрим ещё раз искусственно созданный ручей, имеющий нужное нам устройство (рис. 107). Из верхнего судна вода по двум руслам стекает в нижний сосуд. Отметим, что разность высот между верхним и нижним судом для обоих русел одинакова. Кроме того, общее количество стекающей воды равно сумме её количеств в обоих руслах.

Теперь вернёмся к рассмотрению электрической цепи. Электрочайник и лампочка параллельно подключены к источнику тока. Поэтому напряжение U_1 на лампочке и напряжение U_2 на чайнике равны между собой: $U_1 = U_2 = U$.

! Напряжения между концами параллельно соединённых проводников равны между собой:

$$U_1 = U_2 = U.$$

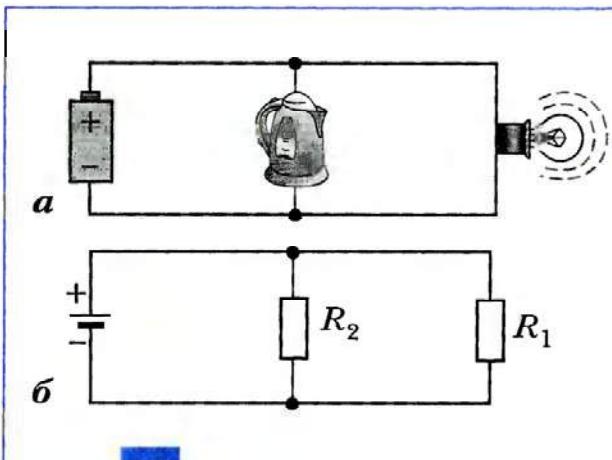


Рис. 106 Схема параллельного соединения проводников:
а – монтажная;
б – электрическая

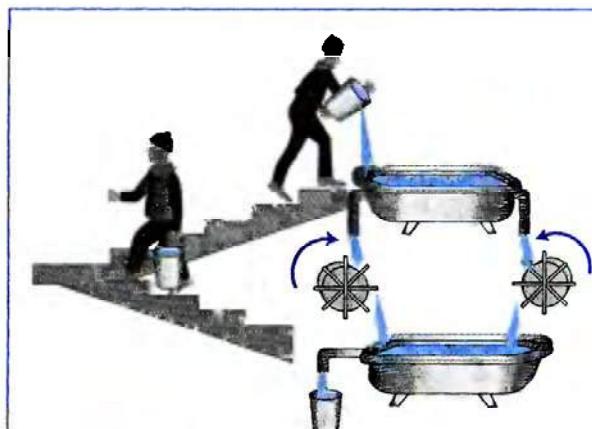


Рис. 107 При «параллельном устройстве» ручья общее количество стекающей воды равно сумме её количеств в обоих руслах

В месте подключения электрочайника и лампочки к положительному полюсу источника тока ток I от источника разветвляется на два тока, подобно двум потокам воды в ручье. Ток I_1 течёт через лампочку, ток I_2 — через спираль чайника. В месте подсоединения чайника и лампочки к отрицательному полюсу источника тока эти два тока соединяются, вновь образуя общий ток I . Понятно, что в этом случае $I = I_1 + I_2$.

Полученное соотношение называют законом сложения сил токов при параллельном соединении проводников.



Сила тока в общей части цепи равна сумме сил токов в параллельно соединённых проводниках:

$$I = I_1 + I_2.$$

Пусть сопротивление нити накала лампочки равно R_1 , сопротивление спирали чайника — R_2 , а общее сопротивление участка цепи, содержащего эти устройства, равно R . Тогда согласно закону Ома для участка цепи:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U}{R_2}, \quad \text{а } I = \frac{U}{R}.$$

Подставляя полученные выражения в закон сложения токов при параллельном соединении проводников, получаем формулу, по которой можно найти общее сопротивление цепи:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Параллельное соединение различных устройств широко используется в сетях жилых помещений. Наиболее распространённое напряжение в бытовой сети составляет 220 В. Поэтому все бытовые устройства для освещения, нагревания и т. д., как правило, рассчитаны на работу при этом напряжении. При включении в сеть параллельно друг другу все они нормально функционируют, так как подаваемое на них напряжение соответствует расчётному.

Задача. Два проводника параллельно подключены к источнику тока. Сопротивления проводников равны $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 25$ Ом. Напряжение между полюсами источника тока $U = 125$ В. Определите: 1) напряжение на каждом проводнике; 2) силу тока в каждом проводнике; 3) силу тока через источник; 4) общее сопротивление проводников.

Решение.

1) При параллельном соединении проводников напряжение на каждом проводнике равно напряжению между полюсами источника:

$$U_1 = U_2 = U = 125 \text{ В.}$$

2) Силу тока в каждом проводнике найдём с помощью закона Ома:

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U}{R_1} = \frac{125}{10} = 12,5 \text{ (A)}; \quad I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U}{R_2} = \frac{125}{25} = 5 \text{ (A)}.$$

3) Силу тока через источник найдём с помощью закона сложения сил токов при параллельном соединении:

$$I = I_1 + I_2 = 12,5 + 5 = 17,5 \text{ (A)}.$$

4) Общее сопротивление R связано с сопротивлениями этих проводников равенством:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{10} + \frac{1}{25} = 0,14 \text{ (1/Ом)}.$$

Поэтому $R \approx 7,14 \text{ Ом}$.

Ответ: $U = 125 \text{ В}$; $I_1 = 12,5 \text{ А}$; $I_2 = 5 \text{ А}$; $I = 17,5 \text{ А}$; $R \approx 7,14 \text{ Ом}$.

Общее сопротивление проводников можно также найти и с помощью закона Ома: $R = \frac{U}{I} \approx 7,14 \text{ Ом}$.

Итоги

Законы параллельного соединения проводников.

Напряжения между концами параллельно соединённых проводников равны между собой: $U_1 = U_2 = U$.

Сила тока в общей части цепи равна сумме сил токов в параллельно соединённых проводниках: $I = I_1 + I_2$.

Общее сопротивление цепи при параллельном соединении проводников рассчитывают по формуле:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Вопросы

1. Какое соединение проводников называют параллельным?
2. Чему равна сила тока в общей части цепи?
3. Почему при параллельном соединении проводников напряжение на всех проводниках одно и то же?
4. Как можно рассчитать общее сопротивление цепи при параллельном соединении проводников?

- 5** Как с точки зрения законов параллельного соединения проводников объяснить зависимость сопротивления проволоки постоянной длины от её толщины?
- 6** Почему с точки зрения законов параллельного соединения проводников вольтметр подключают параллельно к точкам цепи, между которыми необходимо измерить напряжение?
- * 7** Каким должно быть сопротивление вольтметра по сравнению с сопротивлением участка цепи, на котором измеряют напряжение, чтобы его подключение существенно не изменило напряжение на этом участке?

Упражнения

- 1** Два электроприбора, сопротивления которых равны 50 и 30 Ом, подключены параллельно к источнику тока с напряжением 150 В. Найдите: а) напряжение на каждом электроприборе; б) силу тока в каждом из них; в) силу тока через источник; г) общее сопротивление электроприборов.
- 2** Две одинаковые лампочки соединили параллельно и подключили к источнику тока через реостат. Сопротивление каждой из лампочек равно 50 Ом. Сопротивление реостата равно 10 Ом. Напряжение между полюсами источника равно 35 В. Определите силу тока через каждую лампочку.
- * 3** Два проводника — золотой и серебряный — имеют одинаковые длины по 30 см и площади поперечного сечения по 2 мм^2 . Проводники соединяют сначала параллельно, а затем последовательно и подключают к источнику тока. Во сколько раз будет отличаться общее сопротивление проводников в первом и во втором случаях.
- * 4** Напряжение на клеммах источника тока из задачи 3 равно 50 мВ. Найдите силу тока через источник в первом и во втором случаях.

§ 51

Работа и мощность электрического тока

Пусть напряжение между концами некоторого участка электрической цепи равно U . Тогда при прохождении по этому участку заряда q электрическое поле, в соответствии с определением напряжения, совершил работу $A = U \cdot q$. Эту работу называют *работой тока на данном участке цепи*.

! Таким образом, чтобы рассчитать работу электрического тока на каком-либо участке цепи, надо напряжение U на этом участке умножить на прошедший по нему заряд q :

$$A = U \cdot q.$$

Если в течение времени t ток в участке цепи был постоянным, то по определению силы тока (см. § 45) прошедший заряд q равен произведению силы тока I на это время:

$$q = I \cdot t.$$

! Таким образом, для расчёта работы постоянного тока на участке цепи за время t надо напряжение U на этом участке умножить на силу тока I и на это время:

$$A = U \cdot I \cdot t.$$

В СИ работу измеряют в джоулях, напряжение – в вольтах, силу тока – в амперах, а время – в секундах. Поэтому $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ Кл}$.

Вы уже знаете, что средняя за время t мощность N равна отношению работы A , совершенной за это время, к времени t :

$$N = \frac{A}{t}.$$

! Мощность N постоянного тока равна:

$$N = \frac{A}{t} = U \cdot I.$$

Напомним, что единица мощности в СИ – *ватт*:

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ с} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}.$$

Видно, что выражение, полученное для мощности постоянного тока, не зависит от времени. Следовательно, если напряжение между концами участка цепи не изменяется, то мощность постоянного тока на этом участке цепи постоянна.

В таблице 11 приведены мощности некоторых электрических устройств.

Работу постоянного электрического тока за время t можно записать в виде произведения мощности на это время: $A = N \cdot t$. Поэтому на практике часто используют единицу киловатт·час ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ МДж}$). Именно в этих единицах измеряют энергию электросчётчики, установленные у потребителей.

Таблица 11

Устройство	Мощность, кВт
Лампочка карманного фонаря	≈0,001
Холодильник домашний	0,08–0,16
Лампы бытовые осветительные	0,015–0,25
Электрический утюг	0,3–2
Стиральная машина	0,35–3
Электрическая плита	0,2–3
Электропылесос	0,06–3
Персональный компьютер	0,05–0,5
Двигатель троллейбуса	160
Двигатели электровозов	5000–9000
Гидрогенератор электростанции	60000–700000

Примеры решения задач

Задача 1. Какую работу совершают зарядное устройство мобильного телефона за один час зарядки, если напряжение на его клеммах 6 В, а сила тока 500 мА?

Решение.

Работа тока $A = U \cdot I \cdot t = 0,5 \cdot 6 \cdot 3600 = 10,8$ (кДж).

Ответ: 10,8 кДж.

Задача 2. Напряжение между полюсами батареи при подключении к ней лампочки равно 4,5 В. Мощность лампочки $N = 0,001$ кВт. Найти силу тока в спирали лампочки.

Решение.

$$N = U \cdot I. \text{ Поэтому } I = \frac{N}{U} = \frac{1}{4,5} = 0,22 \text{ (A).}$$

Ответ: 0,22 А.

Работа электрического тока на участке цепи равна произведению напряжения U на этом участке на прошедший по нему заряд q :

$$A = U \cdot q.$$

Работа постоянного электрического тока на участке цепи за время t равна произведению напряжения U на этом участке на силу тока I и на это время:

$$A = U \cdot I \cdot t.$$

В СИ работу измеряют в джоулях: $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$.

Мощность N постоянного тока:

$$N = \frac{A}{t} = U \cdot I.$$

Единица мощности в СИ – ватт ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ с} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}$).

На практике для измерения работы в электрических цепях часто используют единицу киловатт·час (кВт · ч). Именно в этих единицах измеряют энергию электросчётчики, установленные у потребителей.

Вопросы

- 1** Как рассчитать работу электрического тока на участке цепи, если известны напряжение между его концами и прошедший по нему заряд?
- 2** Как рассчитать работу постоянного электрического тока на участке цепи, если известны напряжение между его концами, сила тока и время его протекания?
- 3** Как рассчитать напряжение между концами участка цепи, зная силу тока и мощность, выделяющуюся на этом участке?
- 4** Какие единицы работы и мощности вам известны?

Упражнения

- 1** К источнику тока напряжением 220 В подключена лампочка мощностью 60 Вт. Какой ток протекает через эту лампочку?

- 2 Определите работу тока в проводнике, если напряжение между его концами равно 380 В, а прошедший через него заряд равен 15 кКл.
- 3 Определите мощность тока в проводнике из задачи 2, если сила тока равна 2 А.
- 4 Мощность гидроэлектростанции, вырабатывающей постоянный ток, равна 600 МВт. Напряжение между проводами линии электропередачи равно 500 кВ. Определите силу тока в проводах линии.
- 5 Электрические приборы одной квартиры потребляют среднюю мощность 1 кВт · ч в течение 12 ч в сутки, а в оставшееся время суток — мощность 0,5 кВт · ч. Оцените работу тока в этих приборах за один год.
- 6 Два проводника, сопротивления которых равны 24 и 6 Ом, соединили сначала параллельно, а затем последовательно. В обоих случаях их подключали к источнику тока, напряжение между полюсами которого равно 24 В. Во сколько раз отличаются работы электрического тока за 1 ч при этих подключениях?
- 7 Подготовьте реферат по теме «Электроизмерительные приборы». Используйте при подготовке энциклопедии, справочники, материалы интернет-ресурса http://ru.wikipedia.org/wiki/Электроизмерительные_приборы.

§ 52

Закон Джоуля — Ленца.

Электрические нагревательные приборы

В результате работы электрического тока внутренняя энергия проводника увеличивается. Следовательно, его температура должна возрастать. Если же этот проводник находится в тепловом равновесии с окружающей средой, то его температура остаётся неизменной. Поэтому в соответствии с известным вам первым законом термодинамики проводник будет отдавать окружающей среде некоторое количество теплоты Q . Если проводник неподвижен и его температура не изменяется, то это количество теплоты будет равно работе A электрического тока:

$$Q = A = U \cdot I \cdot t.$$

Пусть сопротивление данного проводника (участка цепи) равно R . Тогда, используя закон Ома для проводника (участка цепи) $U = I \cdot R$, получаем:

$$Q = U \cdot I \cdot t = I \cdot R \cdot I \cdot t.$$

Количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током за время t , равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

Полученное соотношение называют *законом Джоуля – Ленца* в честь английского физика Джеймса Джоуля и русского учёного Эмилия Ленца (1804–1865). Они независимо друг от друга получили его на основе проведённых экспериментов.

Явление нагревания проводника в результате работы электрического тока (тепловое действие тока) используется во многих электрических устройствах. Рассмотрим работу некоторых из них.

Лампа накаливания

Основным элементом лампы накаливания является тонкая проволока (спираль), изготовленная из тугоплавкого металла вольфрама. Температура плавления вольфрама равна $3387\text{ }^{\circ}\text{C}$. При протекании по спирали лампы электрического тока она нагревается почти до $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$, раскаляется и светится. Чтобы спираль не сгорала, её помещают в стеклянный баллон, который вместо воздуха наполняют азотом или инертным газом. Эти газы не

только не позволяют спирали окисляться, но и препятствуют испарению атомов вольфрама с её поверхности.

Стандартная лампа накаливания показана на рис. 108. Она состоит из спирали 1, приваренной к двум проволочкам, которые проходят через запаянный стеклянный баллон 2. Одна проволочка подсоединяется к металлическому цилинду 3 с винтовой нарезкой, а другая – к изолированному от цилиндра основанию цоколя 4. Лампу ввинчивают в патрон. В результате основание её цоколя соединяется с пружинящим контактом 5, а цилиндр – с металлическим основанием патрона. Пружинящий контакт и металлическое основание

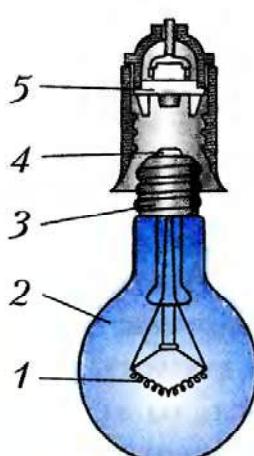


Рис. 108 Лампа накаливания

патрона подсоединяют через выключатель в электрическую цепь. **С**

Нагревательные приборы

К нагревательным приборам, в которых используется тепловое действие тока, относятся электрические плитки, чайники, кипятильники, утюги и т. п. (рис. 109). Основным элементом нагревательного электрического прибора является проводник, обладающий большим удельным сопротивлением и способный выдерживать высокие температуры ($\sim 1000^{\circ}\text{C}$). Обычно для изготовления таких проводников используют специальные сплавы с большим удельным сопротивлением: никром, константан и фехраль (см. табл. 10). Проводник закрепляют на жаропрочном основании.

В результате повреждений, ошибок при подключении и других причин сила тока в электрической цепи может возрасти до недопустимой величины. **К**

В соответствии с законом Джоуля — Ленца это приведёт к перегреву работающих электрических приборов и выходу их из строя, а также к перегреву подводящих проводов, их воспламенению и пожару. Чтобы избежать этого, в электрические цепи включают специальные устройства — *предохранители*.

Наиболее распространёнными являются плавкие предохранители, работа которых основана на тепловом действии тока. Стандартный плавкий предохранитель показан на рис. 110, а. Он состоит из стеклянной трубочки, на концах которой закреплены два металлических колпачка. Внутри трубочки находится тонкая металлическая проволочка, соединяющая колпачки между собой.

Предохранитель включают последовательно в электрическую цепь. Обычно его устанавливают на входе электрических приборов. Если сила

С Лампы накаливания рассчитаны на различные напряжения: 220–240 В — для бытовой сети; 36 В — для освещения некоторых производственных помещений; 12 В — для автомобилей; 2,5 В — для карманных фонариков и т. п. Значение рабочего напряжения, а также мощность в ваттах указывают на лампе.

К Причинами резкого увеличения силы тока в сети могут быть одновременное включение мощных потребителей тока или короткое замыкание в сети, при котором сопротивление одного из участков цепи становится очень мало. В обоих случаях в цепи выделяется большое количество теплоты.

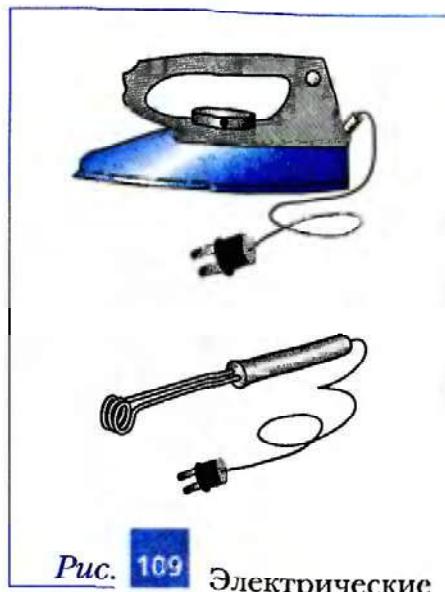
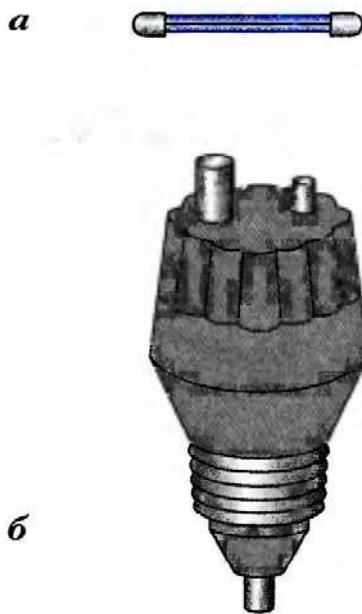


Рис. 109

Электрические нагревательные приборы



Rис. 110 Предохранители:
а – плавкий предохранитель;
б – автоматический,
с биметаллической
пластиной

металлические пластины, в других же – электромагнитные реле. С устройством электромагнитных реле вы познакомитесь в следующей главе.

Задача

Какое количество теплоты выделяется за $t = 1$ мин в спирали автомобильной лампы накаливания сопротивлением $R = 6$ Ом, если на неё подано напряжение $U = 12$ В?

Решение.

Сила тока в спирали лампы по закону Ома равна $I = \frac{U}{R}$. Следовательно, по закону Джоуля – Ленца искомое количество теплоты равно:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{U^2 \cdot t}{R} = \frac{144 \cdot 60}{6} = 1,44 \text{ кДж.}$$

Ответ: $Q = 1,44$ кДж.

тока по каким-либо причинам превышает допустимое для этого прибора (и предохранителя) значение, то проволочка под действием выделяющейся теплоты расплавляется. В результате цепь размыкается и электрический ток прекращается.

Поскольку разные приборы рассчитаны на разные силы тока, то в них необходимо использовать соответствующие предохранители. Значение предельной силы тока, на которую рассчитан предохранитель, указано на его корпусе. Ясно, что такие предохранители являются одноразовыми.

Существуют многоразовые предохранители, работа которых основана на других принципах. Обычно используют *автоматические предохранители* (пробки, рис. 110, б). В некоторых из них используют биметаллические пластины,

Итоги

Закон Джоуля – Ленца.

Количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током за время t , равно произведению квадрата силы тока, сопротивления проводника и времени:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t.$$

На тепловом действии тока основана работа нагревательных приборов, ламп накаливания и тепловых предохранителей.

Вопросы

- 1 Как рассчитать количество теплоты, выделяющееся в проводнике с током?
- 2 Как устроена лампа накаливания? Почему баллоны ламп накаливания наполняют инертным газом?
- 3 Какие материалы используют для изготовления проводников в нагревательных приборах? Почему?
- 4 Зачем нужны предохранители?
- 5 Почему увеличение силы тока в проводке может привести к пожару?
- 6 На чём основано действие плавкого предохранителя?

Упражнения

- 1 К источнику тока последовательно подключены три проволоки одинакового сечения и длины. Проволоки изготовлены из железа, алюминия и меди. Какая из них будет больше нагреваться?
- 2 При какой силе тока в проводе сопротивлением 100 Ом за один час выделится количество теплоты, равное 90 кДж?
- 3 Определите сопротивление проводника электроплитки, если при протекании по нему тока в течение 10 мин выделилось количество теплоты, равное 1,452 МДж. Напряжение между концами проводника равно 220 В.
- 4 Какое количество теплоты выделится за 2 ч в проволочной спирали, изготовленной из железной проволоки длиной 5 м, при силе тока 1 А? Площадь поперечного сечения проволоки равна $0,1 \text{ мм}^2$.

- ✓ 5 Определите мощность всех потребителей электроэнергии в вашей квартире, для чего воспользуйтесь табл. 11 из § 51 и сведениями о потребляемой мощности, указанными на устройствах. Соберите сведения о длительности работы этих устройств за сутки и рассчитайте работу электрического тока за это время (в кВт · ч). Предложите меры по рациональному использованию электроэнергии с целью её экономии.

§ 53 Носители электрических зарядов в газах

При обычных условиях газы состоят из электрически нейтральных атомов или молекул. Поэтому в них нет свободных носителей заряда и они являются хорошими изоляторами.

Однако при сильном нагревании или под действием внешнего облучения отдельные атомы (или молекулы) газа могут потерять часть своих электронов. В результате в газе образуется некоторое количество свободных электронов и положительных ионов. При этом могут образовываться и отрицательные ионы (если электрически нейтральный атом или молекула присоединит к себе один или более свободных электронов). Такой газ называют *ионизированным*.

Если ионизированный газ оказывается в электрическом поле, то его свободные электроны разгоняются под действием электрических сил. Приобретаемой ими кинетической энергии может оказаться достаточно для того, чтобы при соударении с электрически нейтральным атомом (или молекулой) выбить из него ещё один электрон. При этом образуется положительный ион. Такой процесс называют *ударной ионизацией*.

В результате ударной ионизации количество свободных электронов и ионов быстро нарастает, так как образовавшиеся при ударах новые свободные электроны также разгоняются под действием электрических сил и участвуют в ионизации. В таком случае говорят, что процесс приобретает *лавинообразный характер*.

Следовательно, при наличии электрического поля в ионизированном газе выполняются оба условия возникновения электрического тока.

Отметим, что ионизация газа может произойти и под действием сильного внешнего электрического поля (электрический пробой). Для воздуха при нормальных условиях это явление наблюдается, если напряжённость электрического поля приближается к 30 кВ/см.

Ярким примером электрического тока в газах является молния. Образующиеся в результате конвекции воздушные потоки в атмосфере электри-

зуют облака. Возникающее между облаками или между облаками и землёй напряжение достигает десятков миллионов вольт. В результате появляется гигантский разряд — молния.

Толщина молнии может быть больше метра, а её длина — несколько километров. Заряд, переносимый молнией, достигает сотен кулон, а сила тока в ней — около 200 кА.

Удар молнии очень опасен и может привести к разрушению не только различных устройств, но и зданий. Часто удары молнии вызывают пожары.

Для защиты от удара молнии здания и сооружения оборудуют молниеотводами (громоотводами).

Итоги

Газ, в котором образуются носители электрических зарядов — свободные электроны и ионы, называют ионизированным.

При наличии электрического поля в ионизированном газе может возникнуть электрический ток. Одним из примеров электрического тока в газах является молния.

Для защиты от молнии здания и сооружения оборудуют молниеотводами (громоотводами).

Вопросы

- 1 Почему при обычных условиях газы являются хорошими изоляторами?
- 2 Какой газ называют ионизированным?
- 3 Как можно ионизировать газ?
- 4 Какие свободные носители заряда образуются в газе при его ионизации?
- 5 Что такое ударная ионизация?
- 6 При какой напряжённости электрического поля в воздухе при нормальных условиях происходит электрический пробой?

§ 54

Носители электрических зарядов в полупроводниках

Кристаллическая решётка плохих проводников – полупроводников, например германия или кремния, – устроена таким образом, что в отличие от металлов свободных носителей заряда при обычных условиях в них почти нет.

Однако при нагревании полупроводников или их освещении отдельные электроны некоторых атомов приобретают дополнительную энергию и становятся свободными. На месте ушедшего электрона образуется вакансия. Это место называют *дыркой*. На такое свободное место может перейти электрон из соседнего атома. Тогда дырка образуется в том месте, откуда ушёл этот электрон. На освободившееся место может перейти электрон из следующего атома и т. д. Таким образом, *дырка может перемещаться по полупроводнику*.

Дело в том, что недостаток отрицательного заряда в кристаллической решётке такого типа равносителен присутствию в этом месте равного по модулю, но положительного заряда. Поэтому дырка ведёт себя как свободный носитель положительного заряда, по модулю равного заряду электрона.



Таким образом, в полупроводниках имеются свободные носители зарядов двух видов: **электроны и дырки**.

Отметим, что свободные электроны и дырки имеются в полупроводниках и при обычных условиях. Однако их количество очень мало. При нагревании или освещении полупроводников количество свободных носителей резко увеличивается. Создание в полупроводнике электрического поля приводит к их упорядоченному движению. В результате в полупроводнике возникает **электрический ток**.

Чем интенсивнее нагревание или освещение полупроводника, тем больше образуется в нём свободных электронов и дырок. При увеличении количества свободных носителей заряда в полупроводнике его удельное электрическое сопротивление уменьшается.

Это свойство полупроводников используют в специальных устройствах. Так, зависимость сопротивления полупроводников от температуры используют в **терморезисторах (термистерах)**. Их применяют, например, для измерения температуры.

Зависимость же сопротивления полупроводников от освещённости используют в **фоторезисторах**. Их применяют в различных устройствах, реагирующих на изменение освещённости.

Проводимость полупроводников, возникающую в результате их нагревания или освещения, называют *собственной проводимостью*.

Существует и принципиально иной способ создания в полупроводниках свободных носителей заряда. Он основан на внедрении в полупроводник примесей.

Проводимость, возникающую при внедрении в полупроводник примесей, называют *примесной проводимостью*.

Поясним сказанное. Допустим, произошла замена некоторых атомов в полупроводниковом кристалле атомами другого вещества. Если количество электронов на крайних орбитах внедрённого атома не совпадает с количеством электронов у атома, изъятого из решётки, то возможны два варианта.

Пусть у внедрённого атома электронов больше. Тогда после образования связей с соседними атомами часть электронов останется несвязанной. Обычно это один электрон. Его взаимодействие с атомами кристаллической решётки оказывается слабым. Поэтому он легко может стать свободным. Примеси, вызывающие электронную проводимость, называют *донорными* (они отдают электроны).

При внедрении в полупроводник достаточного количества примесных атомов в каждом его кубическом сантиметре может образоваться до 10^{16} свободных электронов. Так, введение в кремний всего 0,1 % фосфора снижает удельное электрическое сопротивление кристалла до $6,5 \cdot 10^{-6}$ Ом/м, т. е. уменьшает его более чем в 10^{12} раз.



Полупроводники, в которых в результате внедрения примесей образуются свободные электроны, называют полупроводниками с *примесной электронной проводимостью* или полупроводниками *n-типа* (от лат. *negativus* — отрицательный).

Заметим, что в целом полупроводник после внесения в него примесей остается электрически нейтральным.

Иной тип проводимости образуется в полупроводнике при внедрении в его кристаллическую решётку атомов, у которых количество электронов на крайних орбитах меньше, чем у атомов самой решётки. Такие примеси называют *акцепторными*. В этом случае при встраивании атома в структуре решётки образуется место, в котором «не хватает» электрона, в результате чего появляется дырка.

! Полупроводники, в которых в результате внедрения примесей образуются дырки, называют полупроводниками с примесной дырочной проводимостью или полупроводниками *p*-типа (от лат. *positivus* — положительный).

В месте контакта полупроводников с примесной дырочной проводимостью и примесной электронной проводимостью образуется так называемый *p-n* переход.

Свободные электроны из области с электронной проводимостью (*n*-область) диффундируют в область с дырочной проводимостью (*p*-область), при этом дырки диффундируют в обратном направлении. Поэтому *p*-область приобретает избыточный отрицательный заряд, а *n*-область — избыточный положительный заряд. Эти заряды создают вблизи границы раздела полупроводников с разной проводимостью электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии носителей заряда. Это поле часто называют запирающим.

При подключении полупроводника с электронной проводимостью к отрицательному полюсу источника тока, а полупроводника с дырочной проводимостью к положительному полюсу (прямое включение *p-n* перехода) действие запирающего поля ослабляется. В результате через *p-n* переход начинает протекать электрический ток, обусловленный движением электронов из *n*-области в *p*-область, а дырок — в обратном направлении.

При изменении полярности подключения источника (к *n*-области подключают положительный полюс источника, а к *p*-области — отрицательный), т. е. при обратном включении, действие источника усиливает запирающее поле. В результате при таком подключении ток через *p-n* переход практически отсутствует.

Свойство *p-n* перехода пропускать ток только в одном направлении широко используют в электро- и радиотехнике. Двухэлектродное устройство, содержащее полупроводник с *p-n* переходом, называют диодом.

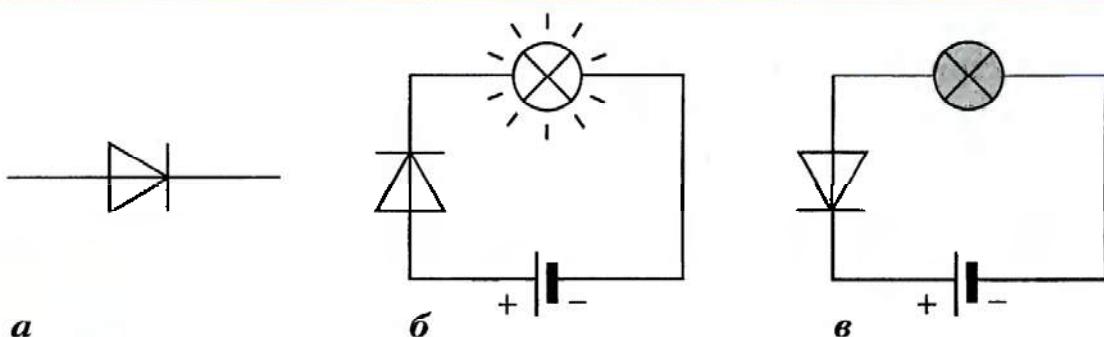


Рис. 111 Диод пропускает электрический ток только в одном направлении

На электрических схемах диод изображают так, как показано на рис. 111, а. На этом рисунке также показаны прямое (б) и обратное (в) включение диода в электрическую цепь.

С другими устройствами (транзисторами, полупроводниковыми лазерами и т. п.), в которых используют *p-n* переходы, и физическими принципами их работы вы познакомитесь в старших классах.

Итоги

В полупроводниках имеются свободные носители заряда двух видов: электроны и дырки.

Проводимость полупроводников, возникающую в результате их нагревания или освещения, называют собственной проводимостью.

Проводимость, возникающую при внедрении в полупроводник примесей, называют примесной проводимостью.

Полупроводники, в которых в результате внедрения примесей образуются свободные электроны, называют полупроводниками с примесной электронной проводимостью или полупроводниками *n*-типа (от лат. *negativus* – отрицательный).

Полупроводники, в которых в результате внедрения примесей образуются дырки, называют полупроводниками с примесной дырочной проводимостью или полупроводниками *p*-типа (от лат. *positivus* – положительный).

В месте контакта полупроводников с примесной дырочной проводимостью и примесной электронной проводимостью образуется так называемый *p-n* переход. Свойство *p-n* перехода пропускать ток только в одном направлении используют в электро- и радиотехнике.

Вопросы

- 1 Почему при обычных условиях такие кристаллические вещества, как германий и кремний, являются плохими проводниками?
- 2 Какие свободные носители заряда имеются в полупроводниках? Что они собой представляют?
- 3 Как можно увеличить количество свободных носителей заряда в полупроводниках?

- 4 Что называют собственной проводимостью полупроводника?
Примесной проводимостью?
- 5 Какие типы примесной проводимости полупроводников вы знаете?
- 6 Что называют *p-n* переходом?

§ 55 Источники тока

Избыточные электрические заряды образуются на полюсах источника тока в результате действия сторонних сил. Эти силы преобразуют различные виды энергии в электрическую.

Например, в *электрофорной машине* в электрическую энергию преобразуется механическая работа, которая совершается при вращении дисков этой машины. Подобные машины обычно используют для получения больших электрических напряжений (до нескольких десятков киловольт). Вы наверняка неоднократно видели применение электрофорной машины в различных опытах на уроках естествознания.

Механическую энергию можно превратить в электрическую также с помощью индукционных генераторов. С работой таких генераторов вы познакомитесь в следующей главе. Индукционные генераторы в настоящее время вырабатывают более 80 % всей потребляемой человечеством электроэнергии.

Существуют источники тока, в которых в электрическую энергию преобразуется теплота. Такие источники называют *термогенераторами*.

В электрическую энергию можно превратить и энергию света. Этот процесс осуществляется в *солнечных батареях* и *фотоэлементах*. С работой таких источников тока вы познакомитесь в старших классах.

Среди различных источников тока наиболее часто в бытовых приборах (пультах дистанционного управления, электронных часах, калькуляторах, радиоприёмниках, карманных фонариках, лазерных указках и т. д.), на транспорте (в автомобилях, на подводных лодках) используют *химические источники тока*.



Рис. 112 Сухой гальванический элемент — электрическая батарейка

К ним относятся гальванические элементы – батарейки (рис. 112) и аккумуляторы (рис. 113). Каждый из вас неоднократно встречался с такими источниками тока.

Действие химических источников тока основано на эффекте, открытом итальянским анатомом Луиджи Гальвани (1737–1798). Он обнаружил, что если прикасаться к препарированной лапке лягушки разными концами соединённых между собой медной и цинковой проволок, то мышцы лапки сокращаются. Гальвани считал, что ему удалось открыть «животное электричество».

Соотечественник Гальвани физик Алессандро Вольта вскоре установил, что сокращающаяся мышца лапки лягушки в опытах Гальвани играет лишь роль индикатора (указателя) электрического тока. Ток же возникает из-за контакта разнородных металлов с жидкостью, находящейся в тканях лапки. Это позволило Вольте в 1799 г. создать первый в истории химический источник тока.

Источник состоял из медного и цинкового кружочков, разделённых кружочком сукна, смоченного серной кислотой. Вольта установил, что при этом медный кружочек заряжается положительно, а цинковый – отрицательно. Напряжение между металлическими кружочками оказалось небольшим (~1 В). Чтобы получить большие напряжения, Вольта положил друг на друга пары медных и цинковых кружочков, также разделив их смоченными кислотой кружочками сукна. Так была создана первая гальваническая батарея – «вольтов столб».

В чём же причина появления напряжения между металлическими кружочками (электродами) в гальваническом элементе?

Исследования показали, что при погружении в раствор кислоты (электролит) некоторые металлы, например алюминий, цинк, железо, никель, начинают растворяться. При этом в электролит переходят положительные ионы этих металлов. Свободные же электроны в электролите не переходят. Поэтому электроды, изготовленные из таких металлов, оказываются заряженными отрицательно, а электролит приобретает избыточный положительный заряд. В результате на границе металла с электролитом в слое молекуллярной толщины создаётся электрическое поле, которое препятствует дальнейшему растворению металла.

Другие металлы, например медь, серебро, платина и золото, притягивают к себе положительные ионы из электролита и благодаря этому заряжаются положительно. В результате на границе между такими металлами и

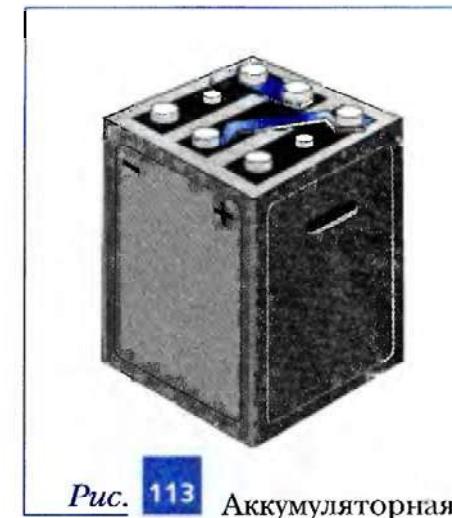
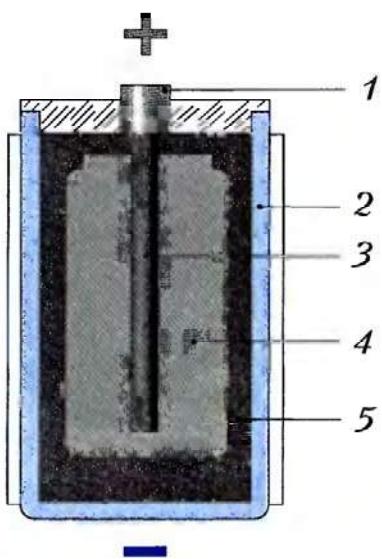


Рис. 113 Аккумуляторная батарея



Rис. 114 Устройство электрической батарейки:

- 1 – положительный электрод;
- 2 – отрицательный электрод в виде цинкового корпуса;
- 3 – графитовый стержень;
- 4 – смесь оксида марганца (MnO_2) и углерода;
- 5 – хлорид аммония (NH_4Cl)

материала электродов. Это явление называют *поляризацией гальванического элемента*. В результате такой поляризации напряжение между электродами гальванического элемента с течением времени уменьшается, а его сопротивление увеличивается. Поэтому через некоторое время элемент становится непригодным для дальнейшей работы. Очевидно, что даже при отсутствии поляризации работа гальванического элемента возможна только ограниченное время – до тех пор, пока не израсходуется растворяющийся электрод.

Иное дело – аккумуляторы, накопители электрического заряда. Накапливаемый аккумулятором электрический заряд обычно измеряют в ампер-часах. Эта величина позволяет определить, в течение какого времени аккумулятор способен обеспечивать заданную силу тока в цепи. Иногда эту величину называют *ёмкостью аккумулятора*. Отметим, что нельзя путать эту величину с рассмотренной нами ранее ёмкостью конденсатора.

На рис. 115 показано устройство широко используемого на транспорте кислотного (свинцового) аккумулятора.

электролитом возникает электрическое поле, препятствующее приближению к электроду положительных ионов.

Таким образом, за счёт действия химических сил между электродами гальванического элемента, изготовленными из разных металлов, возникает электрическое напряжение. При соединении электродов проводником образуется замкнутая электрическая цепь, в которой есть электрический ток. При этом возобновляются процессы растворения отрицательно заряженного электрода и осаждения положительных ионов на другом электроде.

В большинстве современных гальванических элементов вместо заряжающегося положительно металлического электрода используют электрод из графита (рис. 114).

При работе большинства гальванических элементов на электродах выделяются вещества, которые по химическому составу отличаются от

Когда аккумулятор полностью заряжен, его электрод, соединённый с отрицательным полюсом, состоит из чистого свинца. Другой его электрод представляет собой оксид свинца. Электроды находятся в 25–30%-м растворе серной кислоты — *электролите* и разделены между собой пористым изолятором. Корпус такого аккумулятора обычно изготавливают из пластмассы или эбонита. Напряжение между полюсами (клеммами) заряженного аккумулятора близко к 2,2 В.

При подключении аккумулятора к цепи начинается его разряд. При этом с течением времени концентрация серной кислоты уменьшается, а электроды аккумулятора постепенно преобразуются в сульфат свинца. Разряжать такой аккумулятор можно до тех пор, пока напряжение между его клеммами не уменьшится примерно до 1,9 В. Дальнейший разряд приводит к выходу аккумулятора из строя.

Если к полюсам разряженного аккумулятора (соблюдая полярность!) подключить внешний источник тока, то аккумулятор начинает заряжаться. При этом на отрицательно заряженном электроде выделяется водород, а сульфат свинца вновь преобразуется в чистый свинец. На другом электроде выделяется кислород, сульфат свинца на нём преобразуется в оксид свинца. Концентрация серной кислоты при этом увеличивается. В конце зарядки напряжение между полюсами аккумулятора увеличивается до 2,7 В, а за счёт бурного выделения газов электролит в аккумуляторе начинает сильно кипеть. Выделяющаяся при этом смесь водорода с кислородом является взрывоопасной. Поэтому в помещениях, где заряжают аккумуляторы, необходимо строго выполнять правила техники безопасности.

Достоинством кислотных аккумуляторов является их высокий КПД (до 80 %), небольшая стоимость, сравнительно большой срок службы, способность создавать токи до нескольких сотен ампер.

Для питания бытовых приборов применяют щелочные аккумуляторы. В качестве электродов в таких аккумуляторах используют никель, кадмий, серебро и некоторые другие металлы. Преимуществами щелочных аккумуляторов по сравнению с кислотными являются больший срок службы, про-

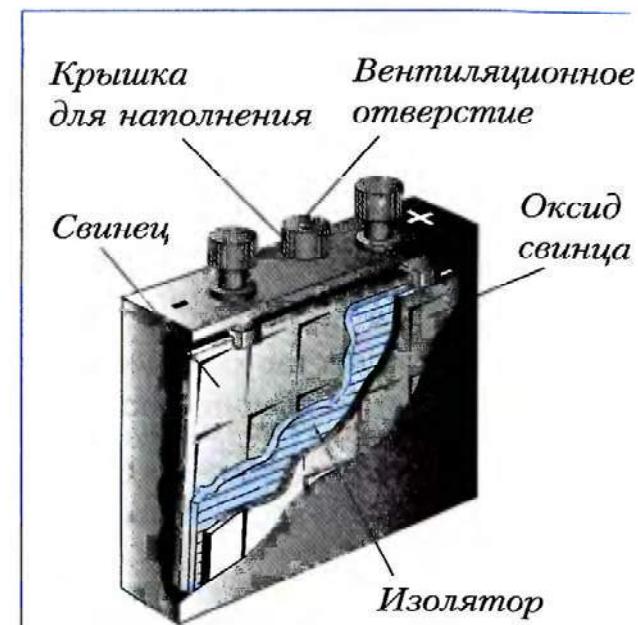


Рис. 115 Устройство кислотного (свинцового) аккумулятора

стота обслуживания и то, что они не боятся механических сотрясений и коротких замыканий.

Итоги

В источниках тока сторонние силы преобразуют различные виды энергии (механическую, тепловую, химическую, энергию света) в электрическую энергию.

В качестве химических источников тока наиболее часто используют гальванические элементы (батарейки) и аккумуляторы.

Вопросы

- 1 Какие из известных вам видов энергии можно преобразовать в электрическую энергию?
- 2 Как называют силы, осуществляющие разделение зарядов в источнике тока?
- 3 Какие виды химических источников тока вы знаете?
- 4 Как устроен гальванический элемент (батарейка)?
- 5 Как устроен аккумулятор?
- 6 Какие виды аккумуляторов вы знаете?
- 7 Кто изобрёл гальванический элемент?

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

При создании в проводнике электрического поля имеющиеся в нём свободные носители заряда начинают упорядоченно двигаться.

Упорядоченное движение заряженных частиц называют электрическим током.

Интенсивность электрического тока в проводнике характеризуют силой тока.

Силой тока I называют физическую величину, равную отношению электрического заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника за время t , к этому времени:

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

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению между концами этого участка.

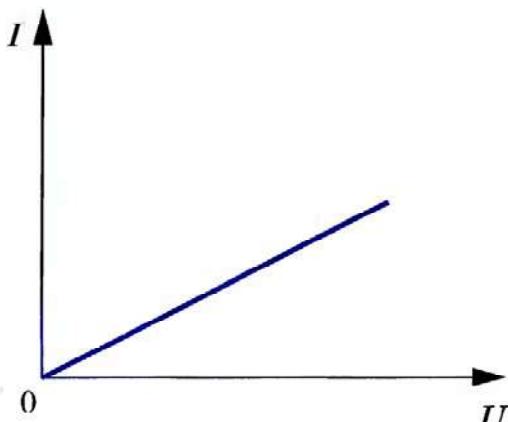
Отношение напряжения U между концами участка цепи (проводника) к силе тока I в нём называют сопротивлением R этого участка цепи (проводника):

$$R = \frac{U}{I}.$$

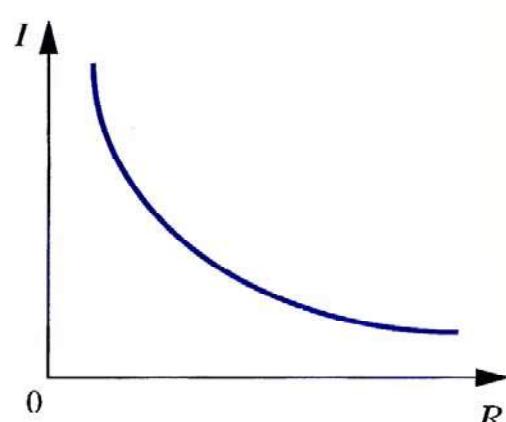
Закон Ома для участка цепи:

$$U = I \cdot R,$$

где U – напряжение между концами участка цепи, I – сила тока в участке, R – его сопротивление.



При $R = \text{const}$



При $U = \text{const}$

$$\text{Сопротивление проводника } R = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где ρ – удельное сопротивление вещества, из которого он изготовлен, l – длина, а S – площадь поперечного сечения проводника.

При последовательном соединении двух проводников:

$$R = R_1 + R_2; \quad I = I_1 = I_2; \quad U = U_1 + U_2.$$

При параллельном соединении двух проводников:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}; \quad I = I_1 + I_2; \quad U = U_1 = U_2.$$

Электрический ток в участке цепи совершает работу $A = U \cdot q$, где U – напряжение между концами этого участка, а q – прошедший по нему заряд.

Если в участке цепи в течение времени t есть постоянный ток I , то $q = I \cdot t$. Поэтому работу этого тока за время t можно рассчитать по формуле:

$$A = U \cdot I \cdot t.$$

$$\text{Мощность постоянного тока } N = \frac{A}{t} = U \cdot I.$$

Для расчёта количества теплоты Q , выделяющегося в проводнике, используют закон Джоуля – Ленца:

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

где I – сила тока в проводнике, R – его сопротивление, а t – время протекания тока.

Электрический ток существует в цепи и совершает работу за счёт работы сторонних сил в источнике тока.

Электромагнитные явления

§ 56 Магниты и их свойства

Ещё в Древней Греции было известно удивительное свойство некоторых сортов железной руды притягивать к себе железные предметы. Эти куски руды находили в окрестностях древнего города Магнессия в Малой Азии. Вероятно, из-за названия города такие куски руды стали называть естественными *магнитами*.

Со временем люди научились делать искусственные магниты. В 1269 г. французский учёный Пьер де Марикур установил, что если стальную спицу потереть естественным магнитом, то она сама станет магнитом. Иначе говоря, спица *намагнитится* и будет длительное время оставаться в таком состоянии.

Тела, которые длительное время сохраняют намагниченное состояние, называют постоянными магнитами, а вещества, из которых они изготовлены, — магнитно-твёрдыми или магнитно-жёсткими. С

К магнитно-твёрдым веществам относятся некоторые сорта стали, чугун, сплавы железа с кобальтом.

Постоянные магниты могут иметь самую различную форму (рис. 116).

Вещества, которые сразу же после того, как убирают намагничивавший их магнит, теряют свойство притягивать к себе другие железные частицы, т. е. размагничиваются, называют магнитно-мягкими.



Постоянные магниты изготавливают также из соединений окислов железа с другими элементами. Такие соединения называют *ферритами*. Ферриты имеют достаточно большое удельное сопротивление, т. е. являются плохими проводниками электрического тока. В ряде случаев из-за этого свойства они предпочтительнее металлических.

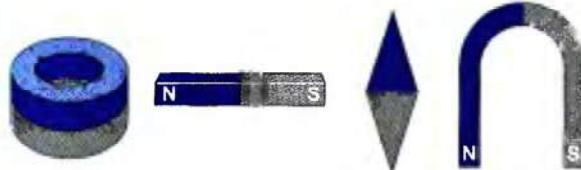


Рис.

116

Различные формы
постоянных магнитов:
цилиндрический, полосовой,
магнитная стрелка, дуговой
(подковообразный)

описал основные свойства постоянных магнитов:

- 1) в разных частях магнита сила притяжения различна; наибольшей она оказывается на двух концах магнита, которые называют *полюсами*;
- 2) если подвесить полосовой магнит (например, *магнитную стрелку – стрелку компаса*) за середину на нитке, то он будет располагаться так, что один его полюс (*северный полюс магнита*) будет указывать на север, а другой (*южный полюс*) – на юг;
- 3) невозможно получить магнит с одним полюсом;
- 4) разноимённые полюса двух магнитов притягиваются, одноимённые – отталкиваются;
- 5) магниты оказывают своё действие через стекло, кожу и воду;
- 6) при сильном нагревании магниты теряют способность притягивать к себе частицы железа – размагничиваются;
- 7) земной шар – большой магнит. Поэтому магнитная стрелка, которая может свободно поворачиваться, всегда устанавливается в определённом направлении: север – юг, если рядом с ней нет других магнитов. **К**

Отметим, что южный полюс постоянного магнита обычно обозначают латинской буквой **S**, а северный – **N**. Отрезок прямой, идущий *вдоль магнитной стрелки в направлении от её южного полюса к северному, называют осью магнитной стрелки.*

Взаимодействие тел, возникающее из-за того, что они намагничены, называют магнитным взаимодействием. Силы этого взаимодействия называют магнитными силами.



К шестому утверждению Гильberta следует добавить, что размагнитить постоянный магнит можно и другими способами, например постукивая его. Поэтому, если вы хотите сохранить постоянный магнит намагниченным, не следует его ронять или стучать по нему.

В природе существуют естественные магниты, которые обладают способностью притягивать железные предметы и намагничивать их.

Тела, которые длительное время сохраняют намагниченное состояние, называют *постоянными магнитами*.

Полосовой магнит (например, *магнитная стрелка* – стрелка компаса), подвешенный за середину на нитке, будет располагаться так, что один его полюс (северный полюс магнита) будет указывать на север, а другой (южный полюс магнита) – на юг.

Отрезок прямой, идущий вдоль магнитной стрелки в направлении от её южного полюса к северному, называют *осью магнитной стрелки*.

Взаимодействие тел, возникающее из-за того, что они намагнечены, называют магнитным взаимодействием. Силы этого взаимодействия называют *магнитными силами*.

Вопросы

- 1 Какие тела называют постоянными магнитами?
- 2 Какие вещества используют для создания искусственных постоянных магнитов?
- 3 Приведите примеры магнитно-жёстких и магнитно-мягких веществ.
- 4 Что называют полюсами магнита? Какими буквами обозначают северный и южный полюса магнита? Что называют магнитной осью стрелки?
- 5 Можно ли изготовить магнит, имеющий только один полюс?
- 6 Когда два магнита будут притягиваться, а когда отталкиваться друг от друга?
- 7 Что такое магнитное взаимодействие?
- 8 Как называют силы магнитного взаимодействия?
- *9 При каких условиях свободно вращающаяся вокруг вертикальной оси магнитная стрелка не будет указывать на север?

Упражнения

- 1 Взьмите маленький железный гвоздик. Исследуйте его притяжение к полосовому и дуговому (подковообразному) магнитам. В каких местах магнитов притяжение гвоздика будет наиболее сильным?
Объясните, почему два железных гвоздика, притянувшись к одному полюсу магнита, расходятся свободными концами.
- 2 Изготовьте самостоятельно полосовой магнит. Для этого возьмите швейную иголку и постоянный магнит, например стрелку компаса. Проведите несколько раз от середины иголки к одному из её концов северным полюсом постоянного магнита, а потом южным полюсом от середины иголки к другому её концу. Прикрепите к середине иголки ниточку и подвесьте на ней иголку горизонтально. Исследуйте, как изменяется положение иголки при перемещении около неё магнита. Выяснив, как ориентируется иголка, когда магнит удалён достаточно далеко, сделайте вывод, какой полюс образовался на том конце иголки, к которому притягивалась северным полюсом магнита.
- *3 Для того чтобы убедиться в справедливости третьего утверждения Гильберта, аккуратно разломили намагниченную иголку пополам с помощью пары плоскогубцев. Удалось ли отделить один магнитный полюс от другого?
- 4 Пусть у вас есть две одинаковые по внешнему виду стальные пластинки, одна из которых намагничена, а другая нет. Определите, не используя какие-либо другие предметы, какая из пластинок намагничена.

§ 57

Магнитное поле. Единица силы тока

Выполнив первые два упражнения из предыдущего параграфа, вы убедились в том, что постоянный магнит действует на стальную иголку даже на довольно большом расстоянии от неё. Таким образом, намагниченные тела подобно наэлектризованным могут взаимодействовать и тогда, когда они непосредственно не касаются друг друга. Напомним, что и гравитационное, и электрическое взаимодействия тел также проявляются на расстоянии. Однако перечисленные виды взаимодействий имеют и существенные различия.

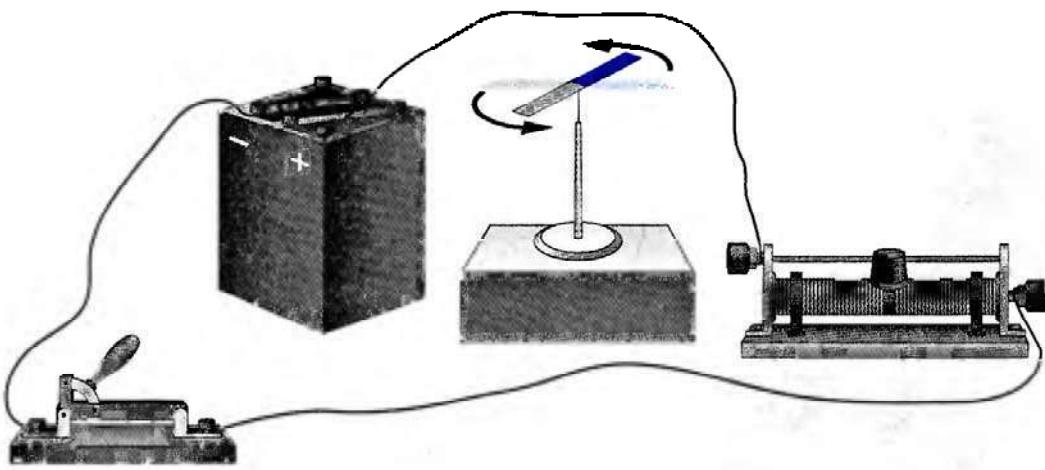


Рис. 117 После замыкания цепи магнитная стрелка поворачивается

Гравитационное взаимодействие существует между всеми известными телами, причём при взаимодействии двух тел они всегда притягиваются друг к другу.

Электрическое взаимодействие наблюдается только у наэлектризованных тел, обладающих зарядами. В результате такого взаимодействия тела могут притягиваться, а могут и отталкиваться.

Электрические взаимодействия всегда сравнивали с магнитными. Благодаря публикации Гильберта о магнитных телах было установлено, что, в отличие от электрически заряженного каким-либо видом заряда тела, намагниченное тело всегда имеет разные полюса, и получить уединённый магнитный полюс невозможно.

! Это означает, что магнитных зарядов (подобных электрическим) не существует.

Учёные полагали, что электрическое и магнитное взаимодействия – совершенно разные типы взаимодействий.

Только в 1820 г. датский физик Ханс Эрстед (1777–1851) обнаружил, что находящаяся вблизи прямого проводника с током магнитная стрелка стремится установиться перпендикулярно проводнику. Схема опыта Эрстеда показана на рис. 117. Из опыта был сделан вывод:

! при протекании тока по проводнику на стрелку действуют магнитные силы.

Вскоре после этого было обнаружено, что и магниты действуют на проводники с током. Так, при пропускании тока по проводнику AB , как пока-

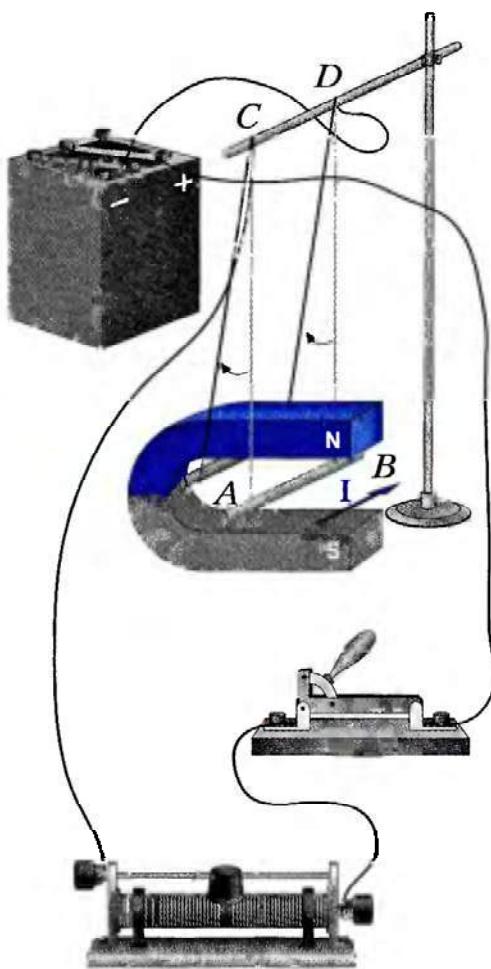


Рис. 118 При прохождении электрического тока по проводнику с током, подвешенному в магнитном поле, проводник смещается к магниту. **Конечно, это не означает, что проводник притягивается к магниту.** На самом деле проводник смещается из-за взаимодействия с магнитом, созданного током в проводнике.

зано на рис. 118, он смещается от своего положения равновесия. В результате проводники *AC* и *BD*, на которых подвешен проводник *AB*, отклоняются от вертикали. Причём чем больше сила тока в цепи, тем сильнее это отклонение.

В том же 1820 г. Андре Ампер установил, что два параллельных проводника с токами взаимодействуют друг с другом подобно магнитам. Если направления токов в проводниках совпадают, то эти проводники *притягиваются* друг к другу (рис. 119, *a*). Если же направления токов *противоположны*, то эти проводники *отталкиваются* (рис. 119, *б*).

! Следовательно, магнитные силы проявляются не только между намагниченными телами, намагниченным телом и проводником с током, но и между проводниками с токами.

Явление магнитного взаимодействия токов используют в СИ для определения единицы силы тока — ампера (А). Это определение можно сформулировать следующим образом.

Один ампер — сила такого постоянного тока, протекание которого по двум тонким длинным прямым параллельным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает между ними взаимодействие с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины проводников.

Напомним, что при описании взаимодействия электрических зарядов говорилось, что каждый заряд порождает электрическое поле. Это поле и оказывает силовое действие на другие заряды.

Точно так же описывают и магнитное взаимодействие.

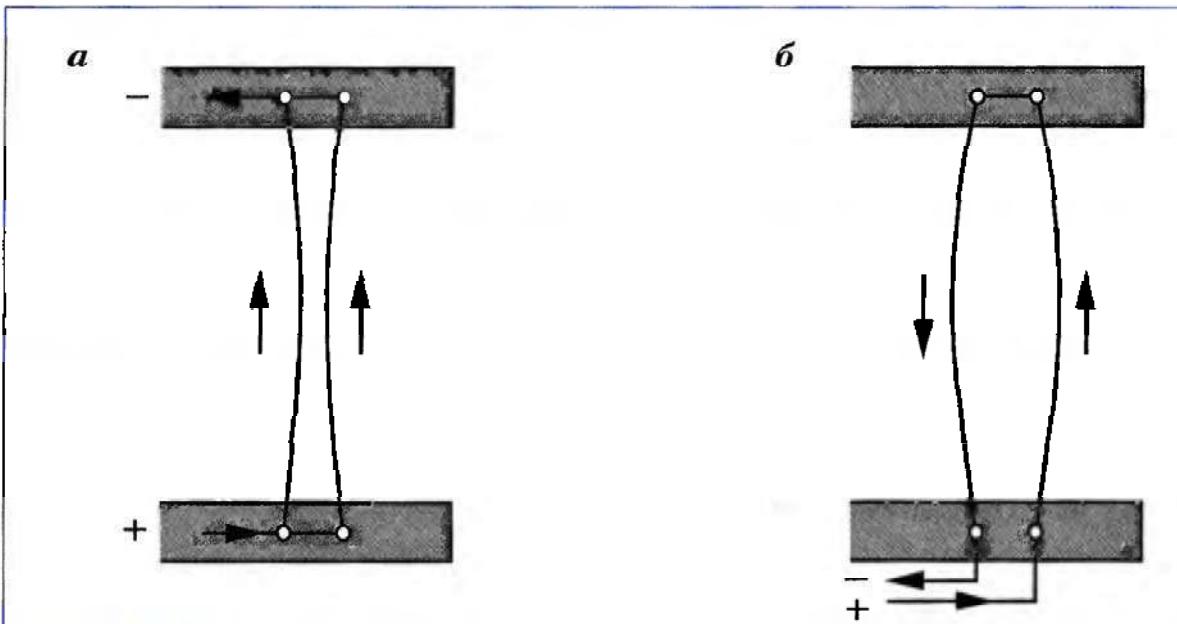


Рис. 119 Два проводника с током взаимодействуют друг с другом подобно магнитам



Намагниченное тело или проводник с током порождает магнитное поле, которое действует на другие намагниченные тела или проводники с током.

Как и электрическое поле, магнитное поле материально. Его можно обнаружить по действию на находящиеся в нём намагниченные тела или проводники с током.

Ток в проводнике представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов. Магнитное поле всегда действует на проводник с током. Поэтому можно предположить, что оно *действует на любой движущийся в нём заряд*. С другой стороны, проводник с током всегда порождает магнитное поле. Отсюда можно заключить, что движущиеся заряды порождают магнитное поле. Эти предположения подтверждаются всеми экспериментами.



Магнитное поле действует на любой движущийся в нём заряд.

Любой движущийся заряд создаёт вокруг себя магнитное поле.

Ещё одно отличие магнитного поля от электрического состоит в следующем: магнитное поле не действует на покоящиеся в нём электрические заряды, а покоящиеся электрические заряды не создают магнитного поля.

Итоги

Магнитное взаимодействие может иметь место: а) между намагниченными телами; б) между проводниками с токами; в) между намагниченными телами и проводниками с токами.

По магнитному взаимодействию двух проводников с токами в СИ определяют единицу силы тока – ампер (А).

Один ампер – сила такого постоянного тока, протекание которого по двум тонким длинным прямым параллельным проводникам, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м друг от друга, вызывает между ними взаимодействие с силой $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины проводников.

Намагниченные тела, проводники, а также движущиеся заряды создают магнитное поле.

Магнитное поле материально. Оно действует на намагниченные тела и движущиеся в нём электрические заряды.

В отличие от электрического поля магнитное поле не действует на покоящиеся в нём электрические заряды и не создаётся неподвижными электрическими зарядами.

Вопросы

- 1 Какие виды взаимодействия между телами, находящимися на некотором расстоянии друг от друга, вам известны?
- 2 Какие тела называют намагниченными?
- 3 При каком условии проводники с токами будут притягиваться друг к другу, если в отсутствие токов проводники не взаимодействуют?
- 4 Как определяют в СИ единицу силы тока?
- 5 Какие физические объекты создают магнитное поле?
- 6 На какие физические объекты действует магнитное поле?
- * 7 Действует ли магнитное поле на покоящиеся в нём электрически заряженные тела, если эти тела: а) не намагнечены; б) намагнечены?

§ 58

Магнитное поле. Линии магнитной индукции

Для наглядности магнитные поля принято изображать при помощи линий, которые называют *линиями магнитной индукции* или *магнитными линиями*. Касательная к магнитной линии в каждой её точке совпадает с осью установившейся магнитной стрелки, помещённой в эту точку.

Направление от южного к северному полюсу установившейся магнитной стрелки принимают за положительное направление магнитной линии. Его отмечают стрелочкой (рис. 120).

Магнитные линии нигде не пересекаются.

Линии магнитной индукции можно провести через любую точку пространства, где есть магнитное поле. Густота этих линий в данной области пространства пропорциональна действию магнитного поля в этой области. Таким образом, там, где магнитные линии сгущаются (их плотность больше), действие магнитного поля также больше.

На рис. 120 показаны одна из магнитных линий поля полосового магнита и несколько магнитных стрелок возле него. Обратите внимание на то, что южные полюсы стрелок обращены к северному полюсу магнита, а северные полюсы этих стрелок — к южному полюсу магнита.

Наглядную картину магнитного поля можно получить с помощью мелких железных опилок — маленьких магнитных стрелок. Для этого магнит накрывают, например, куском стекла, а затем на это стекло сверху более или менее равномерно насыпают железные опилки. Чтобы опилки смогли сориентироваться вдоль поля, преодолев действие на них сил сухого трения, по стеклу слегка постукивают.

Прижмём снизу к стеклу, на которое насыпаны железные опилки, полюса подковообразного магнита. Между полюсами поместим железное, достаточно толстое кольцо. После постукивания по стеклу опилки распределятся так, как показано на рис. 121. Видно, что в области, находящейся над внутрен-

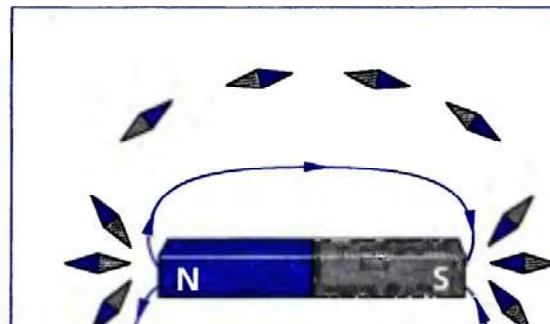


Рис. 120

Касательная к магнитной линии в каждой её точке совпадает с осью магнитной стрелки, помещённой в эту точку

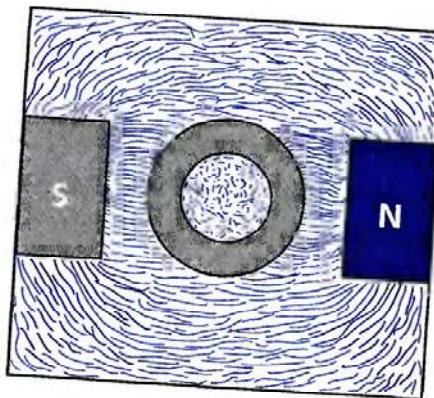


Рис. 121 Внутри железного кольца магнитное поле отсутствует

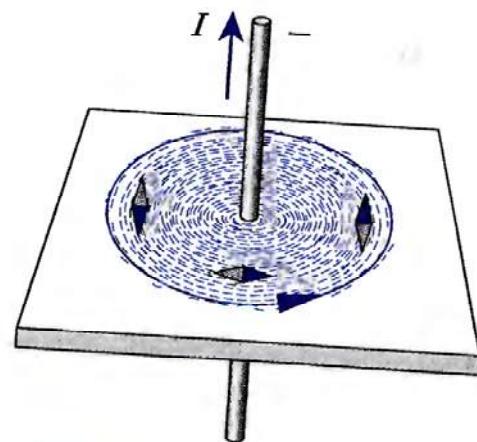


Рис. 122 Железные опилки вокруг проводника с током располагаются вдоль магнитных линий

ней частью кольца, опилки расположены хаотически. Следовательно, в этой области магнитного поля практически нет. Таким образом, достаточно толстое железное кольцо является магнитным экраном. Если этот опыт повторить с алюминиевым, медным или пластмассовым кольцом, то опилки в указанной области будут располагаться практически так же, как при отсутствии этих колец. Следовательно, такие материалы не могут использоваться для изготовления магнитных экранов.

Теперь исследуем картины магнитных полей, создаваемых проводниками с токами.

На рис. 122 показан отрезок прямого проводника, направление тока I в котором совпадает с направлением синей стрелки. Этот проводник проходит через отверстие в листе стекла, на который насыпаны железные опилки.

Из представленной картины видно, что опилки располагаются примерно вдоль окружностей, центры которых лежат на оси проводника.

! Линии магнитной индукции поля, созданного прямым проводником с током, представляют собой окружности, центры которых лежат на оси проводника.

Отметим, что этого и следовало ожидать из соображений симметрии. Плотность расположения опилок уменьшается по мере удаления от оси проводника. Следовательно, при удалении от проводника уменьшается сила, действующая на опилки со стороны магнитного поля, т. е. магнитное поле ослабевает.

Положения магнитных стрелок на рис. 122 позволяют определить положительное направление магнитных линий.

Для определения положительного направления магнитных линий можно использовать так называемое *правило буравчика* (рис. 123).

! Если ввинчивать буравчик (правый винт) по направлению тока в проводнике, то направление вращения рукоятки буравчика будет совпадать с положительным направлением магнитных линий.

В такой форме это правило удобно применять для прямолинейных отрезков проводников с токами. **К**

На рис. 124 показана картина магнитного поля, созданного витком с током. Обратим внимание на то, что и на этой картине *все магнитные линии замкнуты* (либо замыкаются за пределами рисунка).

При пропускании тока по виткам проволоки, намотанной на цилиндрический каркас, — по катушке — магнитные линии полей всех витков с током будут иметь вид, показанный на рис. 125. При достаточноном увеличении числа витков и соответственно длины катушки, когда длина становится в несколько раз больше диаметра катушки (рис. 125, *в*), железные опилки внутри катушки располагаются по *прямым линиям* почти параллельно оси катушки и имеют постоянную густоту. Следовательно, магнитное поле внутри такой катушки практически однородно, а его магнитные линии параллельны

К Существует ещё одно правило буравчика для проводника в форме кольца (см. рис. 124): если ввинчивать буравчик (правый винт) в положительном направлении магнитной линии, проходящей через центр кольца, то направление вращения его рукоятки будет совпадать с направлением тока в этом кольце.

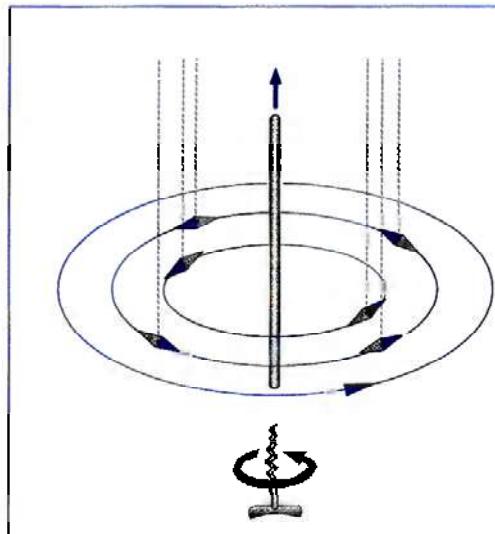


Рис. 123 Если буравчик ввинчивается в направлении тока в проводнике, то его рукоятка вращается в положительном направлении магнитных линий

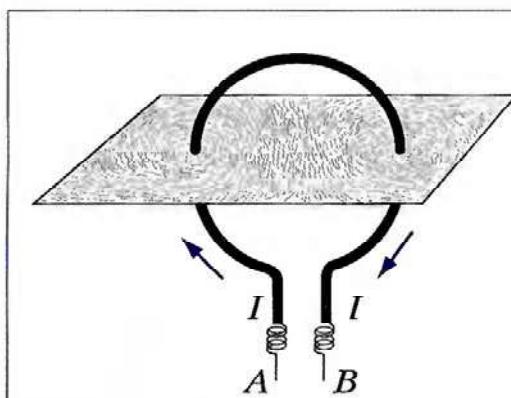


Рис. 124 Картина магнитного поля вокруг витка с током

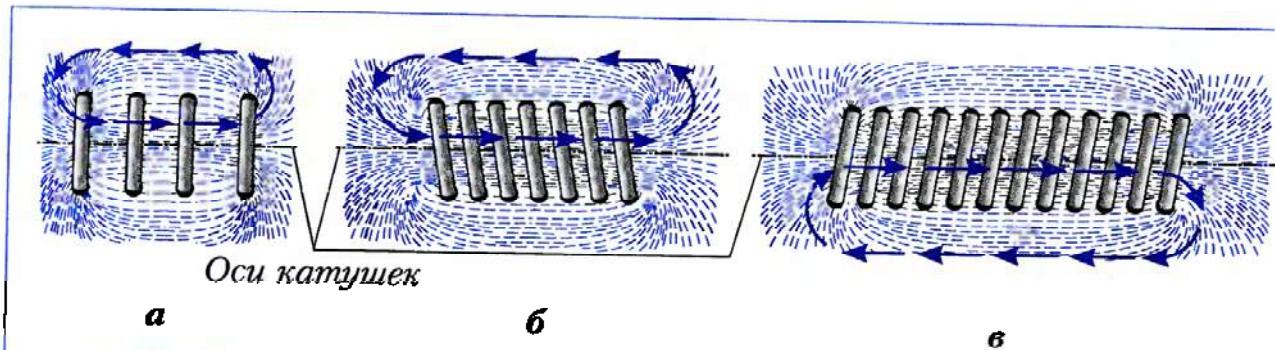


Рис. 125 Магнитные поля внутри катушек с током, имеющих разное число витков

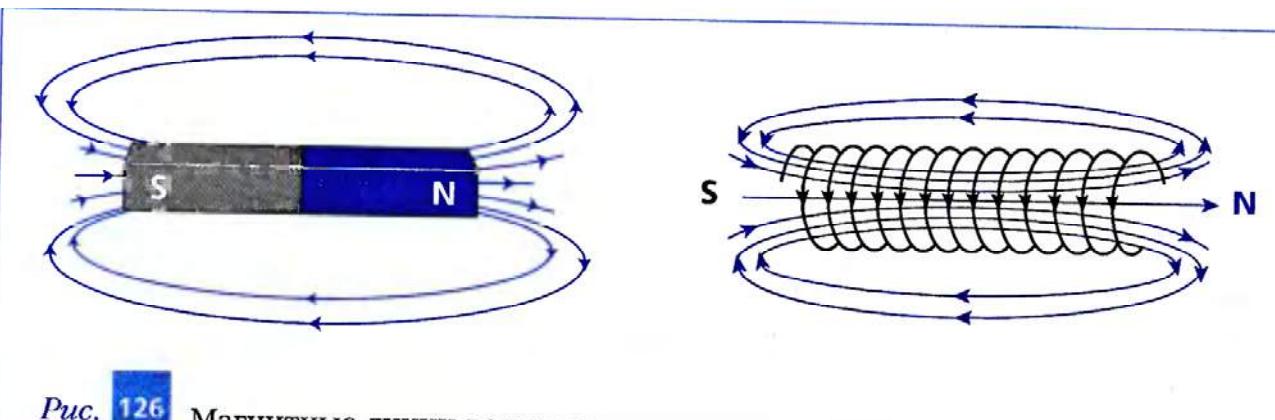


Рис. 126 Магнитные линии вокруг катушки с током полностью соответствуют магнитным линиям полосового магнита

оси катушки. Вблизи торцов катушки магнитные линии искривляются, *выходят из катушки и вновь входят внутрь катушки через её другой торец, нигде не прерываясь.*

Форма магнитных линий вне катушки тождественна форме магнитных линий полосового магнита соответствующих размеров (рис. 126). Понятно, что составить представление о форме магнитных линий внутри постоянного магнита, используя железные опилки, невозможно. Однако исследования показывают, что магнитные линии поля постоянного магнита, как и катушки с током, *нигде не прерываются*.

! Магнитные линии непрерывны.

Напомним, что силовые линии электрических полей, создаваемых зарядами, начинаются на положительных зарядах, а заканчиваются на отрицательных.

! Непрерывность магнитных линий подтверждает сделанный ранее вывод: *магнитных зарядов, подобных электрическим, не существует.*

 Ампер в 1820 г. проанализировал картины магнитных полей проводников с током и постоянных магнитов, а также ряд других экспериментальных данных. В результате он выдвинул гипотезу, что магнитные свойства вещества обусловлены электрическими токами в молекулах вещества — молекулярными токами. Согласно Амперу, *каждая молекула вещества может рассматриваться как некоторый круговой ток*.

Представим себе цилиндрический постоянный магнит. Внутри него в каждом поперечном сечении располагаются круговые молекулярные токи (рис. 127). Они текут в одном направлении. При этом «соседние» токи «соседних» окружностей внутри магнита направлены на встречу друг другу, и поэтому их действие взаимно компенсируется. Нескомпенсированными остаются лишь токи на наружной поверхности магнита. Следовательно, магнитное поле такого постоянного магнита должно быть подобно полю цилиндрической катушки с током (см. рис. 126). Это подтверждается экспериментально.

После того как в начале XX в. была предложена простейшая модель атома, предпринимались попытки отождествить токи Ампера с движением электронов по орбитам атомов. Однако дальнейшие исследования показали, что объяснить магнитные свойства разных веществ только движением электронов в атомах не удаётся. Следует сказать, что и к настоящему времени создание теории, полностью объясняющей магнитные свойства разных веществ, не завершено. Поэтому сейчас обычно вместо термина «молекулярные токи» используют термин «токи Ампера». 

Итоги

Магнитная линия — линия, касательная к которой в каждой её точке совпадает с осью установившейся магнитной стрелки, помещённой в эту точку. Направление от южного к северному полюсу этой стрелки принимают за положительное направление на магнитной линии.

Магнитные линии непрерывны и нигде не пересекаются.

Магнитные линии выходят из северного полюса магнита и входят в его южный полюс.

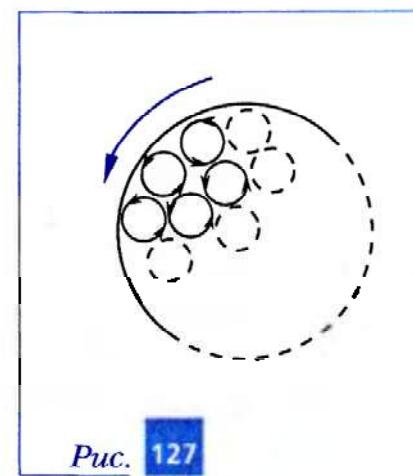


Рис. 127

Из непрерывности магнитных линий, как и из невозможности получить магнит с одним полюсом, следует, что магнитных зарядов, подобных электрическим, не существует.

Положительное направление линий магнитного поля, создаваемого током в проводнике, определяют по правилу буравчика:

если ввинчивать буравчик (правый винт) по направлению тока в проводнике, то направление вращения его рукоятки будет совпадать с положительным направлением магнитных линий.

Вопросы

1. Что такое магнитная линия магнитного поля?
2. Какое направление на магнитных линиях принимают за положительное?
3. Могут ли пересекаться магнитные линии? Ответ обоснуйте.
4. Какие магнитные поля называют однородными? Укажите способ формирования такого поля.
5. Как установится маленькая магнитная стрелка, помещённая в середину длинной катушки с током?
- * 6. Чем принципиально отличаются магнитные линии от линий электрического поля, созданного заряженными телами?
7. В чём состоит гипотеза Ампера?

Упражнения

1. Нарисуйте в тетради картины магнитных полей полосового магнита. Обозначьте полюса магнита и укажите стрелками положительные направления на магнитных линиях.
2. Нарисуйте в тетради магнитные линии поля, созданного витком с током, как показано на рис. 124. Укажите положительные направления этих линий.
3. На рис. 125, б и в синими стрелками указаны положительные направления на магнитных линиях полей, создаваемых током в витках катушек. Определите направление тока в витках катушек. Укажите, какой полюс постоянного магнита будет притягиваться к торцу катушки, в который входят магнитные линии.

- * 4 Длинный изолированный провод сложили пополам и плотно прижали части провода друг к другу. Сложенный провод подвесили над магнитной стрелкой так, чтобы он был параллелен оси стрелки. Изменится ли положение стрелки, если концы провода подключить к аккумулятору?
- 5 Используя гипотезу Ампера, докажите невозможность создания единственного магнитного полюса.

§ 59 Действие магнитного поля на проводники с токами. Сила Ампера

Рассмотрим, как можно описать силовое действие магнитного поля на объекты, способные к магнитному взаимодействию.

Вы уже знаете, что магнитное поле оказывает силовое действие на любой движущийся электрический заряд.

Эксперименты показывают, что это действие зависит, во-первых, от самого магнитного поля, во-вторых, от заряда, на который оно действует, и, в-третьих, от скорости движения этого заряда. При этом чем больше заряд и чем быстрее он движется, тем больше будет действующая на него сила магнитного поля.

Экспериментально охарактеризовать магнитное поле проще всего по его действию на проводник с током. Электрический ток представляет собой упорядоченное движение зарядов. Следовательно, при действии магнитного поля на проводник с током сила этого действия будет тем больше, чем больше число упорядоченно движущихся зарядов и чем больше их скорость.

Поэтому при действии магнитного поля на проводник с током сила этого действия будет тем больше, чем больше сила тока и чем длиннее проводник.

Эксперименты показывают, что сила действия магнитного поля на прямой проводник с током *пропорциональна произведению силы тока на длину проводника*.

Действие силы магнитного поля на проводники с током исследовал Ампер. В его честь эту силу стали называть *силой Ампера*. В результате экспериментов Ампер установил, что сила действия магнитного поля на проводник с током зависит от угла между направлением тока и магнитными линиями. Модуль силы Ампера максимальен, когда этот угол равен 90° . При уменьшении или увеличении этого угла модуль силы уменьшается и становится

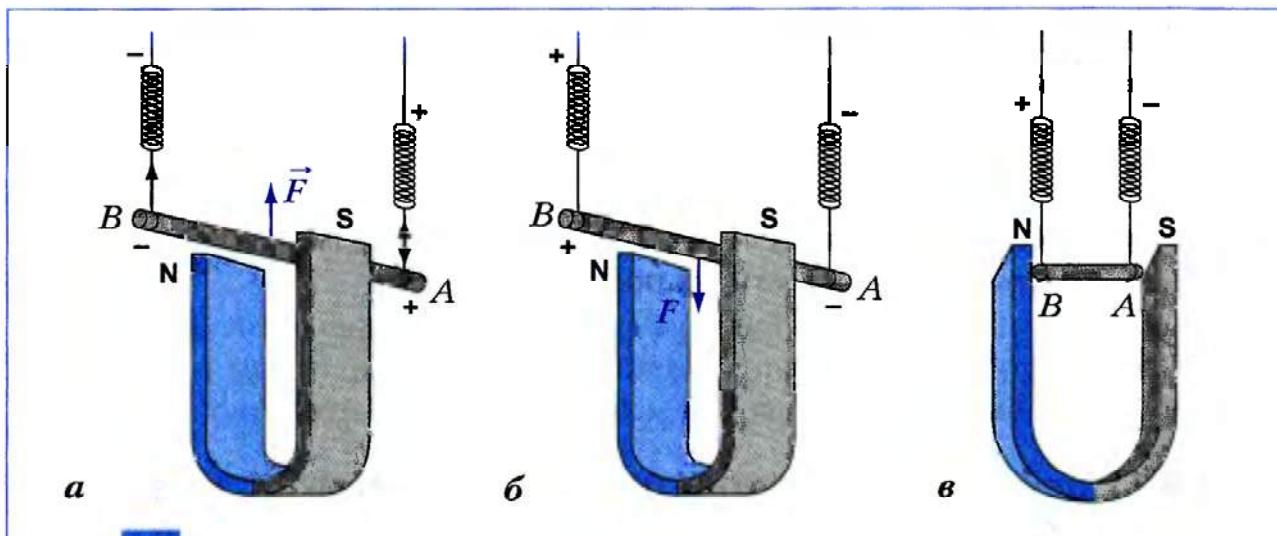


Рис. 128 При изменении направления тока в проводнике меняется направление силы Ампера (*а, б*). Магнитное поле не действует на проводник с током, если он расположен вдоль магнитной линии (*в*)

равным нулю, когда этот угол становится равным нулю или 180° (рис. 128, *в*). В этом случае проводник с током располагается параллельно силовым линиям.

! Таким образом, модуль силы Ампера максимальен, когда угол между направлением тока и магнитными линиями равен 90° , уменьшается при изменении этого угла и становится равным нулю, когда ток направлен параллельно магнитным линиям.

Пусть угол между направлением тока и магнитной линией равен 90° . Тогда модуль силы Ампера максимальен и прямо пропорционален произведению силы тока I на длину l проводника. Коэффициент пропорциональности характеризует силовое действие магнитного поля в области, где находится проводник. В СИ этот коэффициент обозначают латинской буквой B и называют *модулем индукции магнитного поля*.

Модулем индукции B магнитного поля называют физическую величину, равную отношению максимального модуля силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током, к произведению силы тока I в этом проводнике на его длину l :

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Единица индукции магнитного поля в СИ – *tesla* (Тл) названа в честь сербского физика Николы Теслы (1856–1943).

За направление индукции \vec{B} магнитного поля в данной точке принимают положительное направление магнитной линии поля в этой точке.

Если направление и модуль \vec{B} одинаковы во всех точках, то такое поле называют однородным.

Если известны направление и модуль индукции однородного магнитного поля, то можно рассчитать максимально возможный модуль силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током.

! Если угол между направлением тока в проводнике и вектором индукции магнитного поля равен 90° , то модуль силы Ампера равен произведению силы тока I , модуля B индукции магнитного поля и длины l проводника:

$$F = I \cdot B \cdot l.$$

Направление силы Ампера можно определить с помощью так называемого *правила левой руки* (рис. 129).

1) Расположим ладонь левой руки так, чтобы вытянутые четыре пальца указывали направление тока.

2) Повернём ладонь так, чтобы магнитные линии входили в ладонь.

3) Расположим большой палец так, чтобы он остался в одной плоскости с остальными пальцами, но был перпендикулярен к ним.

Большой палец покажет направление силы Ампера.

Таким образом, сила Ампера направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат проводник с током и магнитная линия.

Воспользуемся приобретёнными знаниями для исследования действия однородного магнитного поля на проволочную прямоугольную рамку с током.

Пусть плоскость рамки совпадает с плоскостью, в которой располагаются магнитные линии однородного поля (рис. 130). Будем удерживать рамку в этом положении. Направление тока в рамке показано на рисунке чёрными стрелками. Поскольку в плотно перевитых подводящих проводниках токи текут в противоположных направлениях, то силы Ампера, действующие на эти проводники, взаимно компенсируются.

Направления токов на горизонтальных участках рамки параллельны магнитным линиям. Поэтому силы Ампера, действующие на эти участки, равны нулю. Используем правило левой руки для определения направления

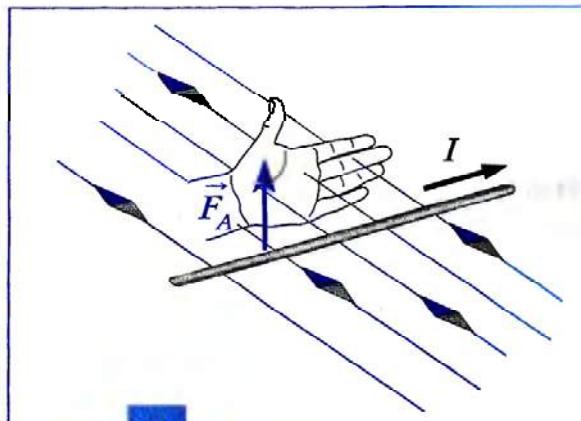


Рис. 129

Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки

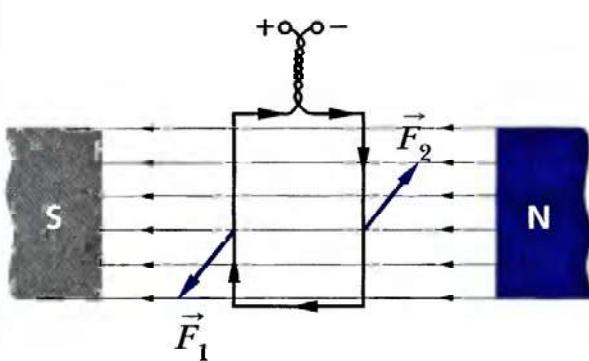


Рис. 130

Магнитное поле оказывает действие на рамку с током и заставляет её поворачиваться

сил Ампера \vec{F}_1 и \vec{F}_2 , действующих на вертикальные стороны рамки. Они будут направлены так, как показано на рис. 130. Модули этих сил будут равны $F = B \cdot I \cdot l$, где B – модуль индукции магнитного поля, I – сила тока, а l – длина вертикальной стороны рамки.

Если перестать удерживать рамку, то под действием сил Ампера она начнёт поворачиваться. Рамка будет стремиться принять положение устойчивого равновесия. Можно убедиться, что в этом положении её плоскость будет перпендикулярна магнитным линиям.

Итоги

Магнитное поле характеризуют по его силовому действию на проводник с током.

Силу, действующую на проводник с током со стороны магнитного поля, называют силой Ампера.

Модуль силы Ампера максимальен, когда угол между направлением тока и магнитными линиями равен 90° , уменьшается при изменении этого угла и становится равным нулю, когда ток направлен параллельно магнитным линиям.

Модулем индукции B магнитного поля называют физическую величину, равную отношению максимального модуля силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током, к произведению силы тока I в этом проводнике на его длину l :

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

В СИ единица индукции магнитного поля – тесла (Тл).

За направление индукции \vec{B} магнитного поля в данной точке принимают положительное направление магнитной линии в этой точке.

Если угол между направлением тока в проводнике и вектором индукции магнитного поля равен 90° , то модуль силы Ампера равен произведению силы тока I , модуля B индукции магнитного поля и длины l проводника:

$$F = I \cdot B \cdot l.$$

Сила Ампера направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат проводник с током и магнитная линия.

Направление силы Ампера можно определить с помощью правила левой руки.

Вопросы

- 1 Как соотносятся модули сил, действующих со стороны однородного магнитного поля на прямолинейный проводник с током длиной l и на его половину ($l/2$)? Объясните свой ответ с точки зрения силового действия магнитного поля на упорядоченно движущиеся заряды.
- 2 Как изменится сила действия магнитного поля на проводник с током при увеличении силы тока в проводнике? Почему?
- 3 Что называют модулем индукции магнитного поля?
- 4 Куда направлен вектор индукции магнитного поля?
- 5 Как называют единицу индукции магнитного поля в СИ?
- 6 Какую силу называют силой Ампера?
- 7 Как определить направление силы Ампера?
- 8 Как изменится сила Ампера, если изменить:
 - а) направление тока в проводнике;
 - б) направление вектора индукции магнитного поля на противоположное, не изменяя модуль?
- 9 Как действует однородное магнитное поле на рамку с током?

Упражнения

- 1 Длинный изолированный провод сложили пополам и, плотно прижав, приклеили части провода друг к другу. Полученный провод поместили в магнитное поле перпендикулярно его силовым линиям. Изменится ли сумма сил, действующих на провод, если его концы подключить к источнику тока?

2 Как изменяются силы Ампера, действующие на каждую сторону прямоугольной рамки с током, находящейся в однородном магнитном поле (см. рис. 130), если силу тока в ней увеличить в два раза?

***3** В каком случае рамка с током находится в устойчивом положении равновесия в однородном магнитном поле?



§ 60

Для дополнительного изучения

Электродвигатели. Гальванометр

На действии магнитного поля на рамку с током основана работа многих приборов, без которых трудно представить себе современную жизнь.

Одним из таких приборов является **электродвигатель** (электромотор). На рис. 131 показана простейшая модель коллекторного электродвигателя. Рамка 1 может вращаться вокруг вертикальной оси. К выводам рамки прикреплены два полукольца 2 – **коллектор**. К каждому из этих полукольц 3, соединённая с одним из полюсов источника тока.

Рамка находится в поле, создаваемом полюсами постоянного магнита. При замыкании ключа она начинает поворачиваться под действием сил Ампера, стремясь принять положение устойчивого равновесия. При этом одновременно с рамкой поворачиваются и полукольца. В тот момент, когда рамка проходит положение устойчивого равновесия, контакт полукольца со щётками нарушается. По инерции рамка продолжает поворачиваться, и контакт полукольца со щётками восстанавливается. При этом ток в рамке из-

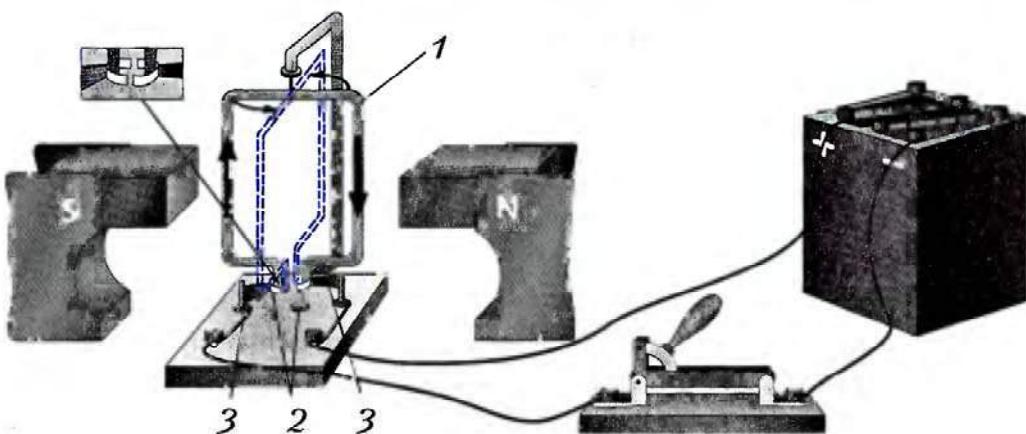


Рис. 131 Модель коллекторного электродвигателя

меняет своё направление на противоположное. В результате рамка продолжает раскручиваться в первоначальном направлении.

Коллекторные двигатели применяют во многих бытовых приборах, например электробритвах, пылесосах, электродрелях. В автомобилях такие электродвигатели используют для запуска двигателей внутреннего сгорания. Электродвигатели постоянного тока приводят в движение электропоезда и троллейбусы.

Современные электродвигатели могут иметь мощность от долей ватта до тысяч киловатт. Коэффициент полезного действия мощных электродвигателей достигает 90 %. Такого большого коэффициента полезного действия не имеют никакие другие двигатели. К преимуществам электродвигателей по сравнению с двигателями внутреннего сгорания относятся также их малые габариты, высокая надёжность, простота управления режимами работы и экологичность.



На явлении вращения рамки с током в магнитном поле основано также действие наиболее распространённых стрелочных электроизмерительных приборов: амперметров, вольтметров и омметров (приборов для измерения сопротивления).

На рис. 132 показано устройство чувствительного амперметра — *гальванометра*. Он состоит из подковообразного постоянного магнита, между полюсами которого располагается лёгкая рамка 1 с прикреплённой к ней стрелкой. Рамка может поворачиваться вокруг горизонтальной оси. На рамку намотано несколько витков изолированной проволоки. Концы этой проволоки через спиральные пружинки 3 соединяются с клеммами гальванометра. В отсутствие тока спиральные пружинки удерживают рамку в горизонтальном положении. При этом стрелка указывает на нулевое деление шкалы.

При пропускании через рамку постоянного тока в ту или иную сторону она поворачивается вместе со стрелкой в соответствующую сторону на определённый угол.

Для того чтобы угол поворота рамки был пропорционален силе тока, модуль индукции магнитного поля при повороте рамки должен оставаться **неизменным**. Кроме того, направление вектора индукции должно оставаться параллельным

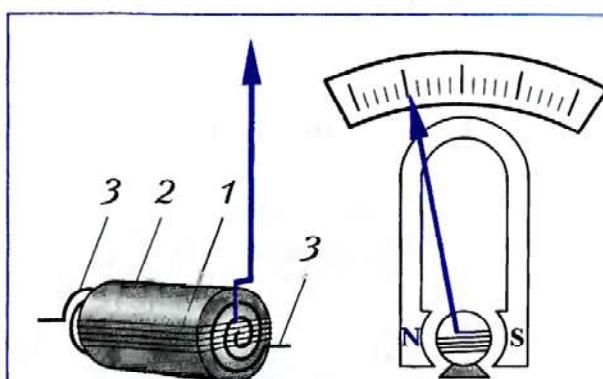


Рис. 132

Принцип действия гальванометра основан на явлении вращения рамки с током в магнитном поле

плоскости рамки. Для выполнения этих условий магниту придают специальную форму (см. рис. 132), а внутрь рамки помещают железный цилиндр 2.

Современные гальванометры позволяют измерять силу тока от десятых долей микроампера до десятков миллиампер. Сопротивление катушек гальванометров, позволяющих измерять токи $\sim 10^{-7}$ А, составляет 100–300 Ом, а у гальванометров для измерения токов ~ 10 мА и более оно не превышает 5 Ом.

Для измерения силы тока, превышающей максимально допустимое значение для данного гальванометра, параллельно его клеммам подключают резистор с малым сопротивлением. Если гальванометр используют для измерения напряжения (в качестве вольтметра), то последовательно с ним включают резистор с достаточно большим сопротивлением.

Вопросы

- 1 В чём заключается принцип действия коллекторного электродвигателя?
- 2 Где применяются электродвигатели? Каковы их преимущества?
- 3 Как изменить направление вращения ротора коллекторного электродвигателя?
- 4 Что такое гальванометр? Как он устроен?
- *5 Как надо подключать к клеммам гальванометра резистор для измерения силы тока, превышающей допустимое значение для данного гальванометра?
- *6 Как надо подключать к клеммам гальванометра резистор, чтобы измерять напряжение? Почему обычно нельзя измерять напряжение непосредственно гальванометром?

Упражнения

- 1 Гальванометр предназначен для измерения токов, не превышающих 1 мА. Сопротивление катушки гальванометра равно 10 Ом. Определите сопротивление резистора, который нужно подключить параллельно клеммам гальванометра, чтобы можно было измерять токи до 10 А.
- 2 Определите сопротивление резистора, который нужно включить последовательно с гальванометром из упражнения 1, чтобы с его помощью можно было измерять напряжения до 100 В.
- 3 Изучите устройство школьного демонстрационного гальванометра. Объясните принцип его работы.

§ 61 Электромагниты и их применение

Вы уже знаете, что на торцах катушки, по виткам которой протекает электрический ток, образуются магнитные полюсы. Такая катушка приобретает свойства магнита и притягивает к себе намагничающиеся предметы. От чего же зависит магнитная сила катушки с током?

! Опыты показывают, что магнитная сила катушки увеличивается, если: 1) увеличить силу тока в её витках; 2) увеличить число её витков; 3) поместить внутрь катушки стержень из магнитно-мягкого материала. Такой стержень называют **сердечником**.

Увеличение магнитной силы катушки с помощью сердечника объясняют тем, что токи Ампера в разных местах сердечника под действием не большого магнитного поля катушки ориентируются так, что порождаемые ими магнитные поля усиливают магнитное поле катушки. В результате модуль индукции магнитного поля катушки с сердечником увеличивается в сотни, а то и в тысячи раз. При выключении тока в катушке магнитные поля, создаваемые токами Ампера, хаотически изменяют свои направления. В результате происходит размагничивание сердечника.

Катушку с сердечником из магнитно-мягкого материала называют электромагнитом.

Электромагниты применяются во многих технических устройствах. Рассмотрим работу некоторых из них.

Электромагнитное реле

Устройство электромагнитного реле показано на рис. 133. При помощи такого реле управляют работой мощного электродвигателя 5 с удалённо-

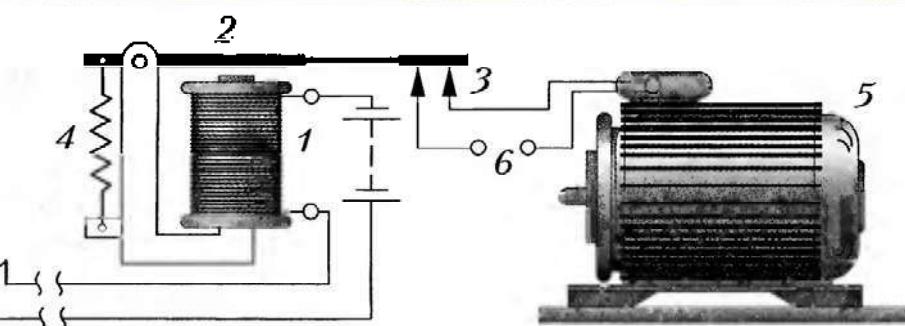


Рис. 133 Электромагнитное реле управляет работой электродвигателя:
1 – электромагнит; 2 – якорь; 3 – контакты; 4 – пружина;
5 – электродвигатель; 6 – контакты цепи питания электродвигателя

го от него пульта. Сила тока, потребляемого мотором, составляет $\sim 10^3$ А. Подводить провода, в которых текут такие большие токи, к удалённому пульту управления технически сложно. Поэтому для включения и выключения этого мотора используют электромагнитное реле, в котором токи не превышают 1 А. На рисунке цифрой 1 обозначен электромагнит, цифрой 2 – якорь реле. Он представляет собой намагничивающуюся пластинку, которая может замыкать контакты 3 цепи питания электромотора 5. При замыкании оператором ключа *K* в витках катушки электромагнита возникает ток, и она притягивает якорь 2. В результате замыкаются контакты 3 и мотор начинает работать. Пружина 4 обеспечивает размыкание контактов при выключении оператором ключа *K*.

Электрический звонок

Электромагнит электрического звонка (рис. 134) состоит из п-образного сердечника, на который надеты две последовательно включённые катушки 1. При отсутствии тока в витках катушки контактная пружина 3 якоря 2 соединяет через контакт *C* один из концов обмотки электромагнита с клеммой *B*.

При нажатии на кнопку звонка между клеммами *A* и *B* возникает напряжение. В витках катушек появляется ток. В результате якорь притягивается к полюсам электромагнита. Его молоточек 4 ударяет по звонковой чашке 5.

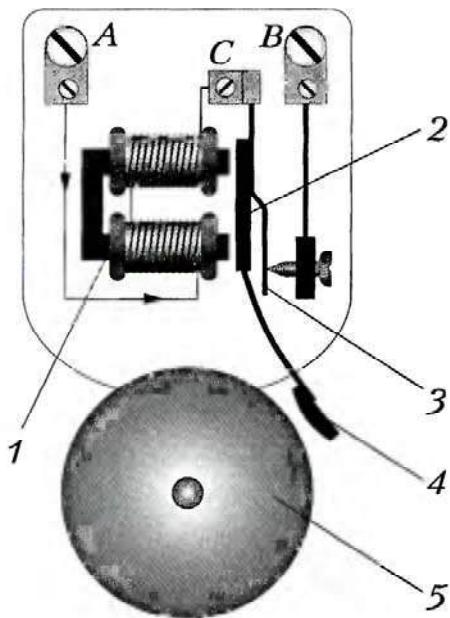


Рис. 134 Электромагнит обеспечивает работу звонка

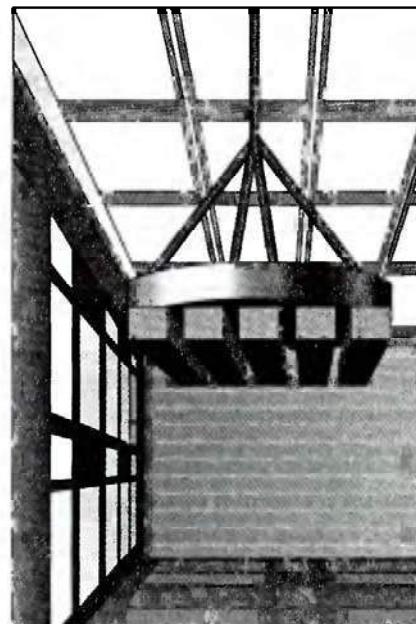


Рис. 135 Пример использования электромагнита

Одновременно в результате смещения пружины 3 размыкается цепь питания катушек. Под действием упругих сил якорь возвращается в исходное состояние и процесс повторяется. Таким образом, пока нажата кнопка звонка, молоточек якоря периодически ударяет по звонковой чашке и звонок звонит.

Электромагниты, имеющие большую подъёмную силу (рис. 135), используют на заводах для переноски стальных и чугунных заготовок массой до нескольких тонн.

Вопросы

- 1 Что такое электромагнит?
- 2 Для чего в электромагнитах используют сердечники из магнитно-мягких материалов? Почему сердечники электромагнитов не делают из магнитно-жёстких материалов?
- 3 Каким образом можно регулировать подъёмную силу электромагнита?
- 4 Как можно изменить полярность полюсов электромагнита?
- 5 Как устроено реле для дистанционного управления электрическими устройствами?
- 6 Как устроен электрический звонок?
- *7 При работе электромагнитного крана (см. рис. 135) часть груза не оторвалась от электромагнита после выключения тока в его обмотке. Крановщик пропустил по обмотке небольшой ток в обратном направлении. В результате оставшаяся часть груза оторвалась. Как это объяснить?



§ 62

Для дополнительного изучения

Магнитное поле Земли

Известно, что ещё за несколько столетий до начала нашего летоисчисления китайцы умели ориентироваться с помощью компаса, о чём имеются письменные свидетельства. Однако в Европе пользоваться компасом начали только примерно в XII в. Накопленные к XVI в. экспериментальные данные позволили сделать вывод, что Земля является большим магнитом.

Напомним, что по договорённости конец магнитной стрелки, указывающий на север, когда эта стрелка ориентируется только под действием магнитного поля Земли, называют её северным полюсом. Поскольку намагниченные

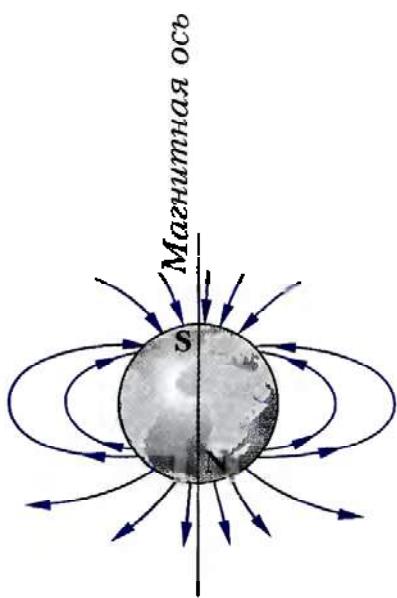


Рис. 136 Земля имеет магнитное поле, южный полюс S которого находится вблизи Северного географического полюса Земли

токи внутри самой Земли и в атмосфере.

На рис. 136 показана магнитная ось Земли и несколько силовых линий её магнитного поля. В настоящее время угол между магнитной осью и осью вращения Земли равен примерно 11° . При приближении к магнитным полюсам касательные к линиям магнитного поля Земли образуют с горизонтом всё больший угол. В точке с координатами 75° северной широты и 99° западной долготы касательные к линиям магнитного поля Земли становятся почти вертикальными. Здесь и находится южный магнитный полюс Земли.

Северный магнитный полюс Земли находится вблизи её Южного географического полюса. Он расположен сейчас в точке с координатами примерно 66° южной широты и 140° восточной долготы.

Таким образом, магнитные полюсы не совпадают с географическими. Поэтому для точного определения географического положения с помощью компаса необходимо вносить надлежащие поправки.

Установлено, что точки максимального сближения силовых линий магнитного поля Земли лежат не на её поверхности, а под ней. Расстояние между этими точками составляет примерно 2300 км, в то время как диаметр Земли превышает 12 000 км. Установлено также, что прямая, проходящая через оба магнитных полюса Земли, не проходит через центр Земли.

тела притягиваются друг к другу разноимёнными полюсами, то *южный магнитный полюс Земли находится вблизи ее Северного географического полюса, а северный магнитный полюс — вблизи Южного географического полюса Земли*.

Исследования показали, что положение магнитных полюсов Земли медленно (в течение тысячелетий) изменяется. Установлено также, что наряду с вековыми изменениями магнитного поля Земли имеют место *небольшие периодические изменения* в течение суток и в течение года. Теория этих изменений, как и теория происхождения земного магнетизма, до сих пор не разработана полностью. Однако установлено, что большую роль в создании магнитного поля Земли играют

Иногда внезапно положение магнитной стрелки, ориентирующейся только под действием магнитного поля Земли, кратковременно резко изменяется. Такие явления называют магнитными буями. Их возникновение связано с солнечной активностью.

Отметим также, что на Земле встречаются области, где магнитная стрелка сильно и постоянно отклонена от ожидаемого направления. Эти области называют областями *магнитной аномалии*. Причиной таких аномалий являются крупные залежи железных руд. Одна из областей магнитной аномалии находится на территории нашей страны в Курской области. Она известна как Курская магнитная аномалия.

Следует отметить, что магнитное поле Земли защищает нас от губительного действия космических заряженных частиц.

Вероятно также, что магнитное поле Земли помогает многим животным и птицам ориентироваться при перемещениях на большие расстояния. Как известно, люди для этих целей используют компас (рис. 137).

Итоги

Экспериментальные данные позволили сделать вывод, что Земля является большим магнитом.

В настоящее время южный магнитный полюс Земли находится вблизи её Северного географического полюса, а северный магнитный полюс — вблизи её Южного географического полюса.

Магнитные полюсы Земли медленно (в течение тысячелетий) изменяют своё положение. Наряду с этим имеют место небольшие периодические изменения их положения в течение суток и в течение года.

Резкие внезапные кратковременные изменения магнитного поля Земли называют магнитными буями. Они связаны с процессами, происходящими на Солнце.

Области поверхности Земли, где наблюдаются резкие постоянные отклонения направления магнитных линий от ожидаемого, называют областями магнитной аномалии. Установлено, что в этих местах имеются крупные залежи железных руд.



Рис. 137

Стрелка компаса устанавливается вдоль линий магнитного поля Земли

Вопросы

- 1 Где находятся северный и южный магнитные полюсы Земли?
- 2 Остаётся ли неизменным положение этих полюсов?
- 3 Как будет вести себя магнитная стрелка над магнитным полюсом Земли, если она может свободно вращаться вокруг: а) горизонтальной; б) вертикальной оси только под действием магнитного поля Земли?
- 4 Что такое магнитные бури? С чем они связаны?
- 5 Что такое магнитная аномалия? Где в России наблюдаются такие аномалии?

Упражнения

- 1 В работах У. Гильберта говорится, что если бить молотком по стальной полосе, расположенной с севера на юг, то она намагнитится. Объясните это явление. Где будут располагаться северный и южный полюсы намагниченной таким образом стальной полосы?
- 2 Будут ли одинаковыми показания чувствительных рычажных весов, если на них первый раз взвешивать подвешенный за один из концов, т. е. вертикально, размагниченный стальной стержень, а второй раз — тот же стальной стержень, но предварительно намагниченный? Зависит ли результат взвешивания от географического места проведения опыта?

§ 63

Опыты Фарадея. Электромагнитная индукция

После открытия Эрстедом влияния проводника с током на магнитную стрелку многие учёные поставили перед собой вопрос: если электрический ток создаёт магнитное поле, то нельзя ли, наоборот, с помощью магнитов создать электрические токи? Более десяти лет никто не мог получить на него положительный ответ. Только в 1831 г. английский физик Майкл Фарадей (1791–1867) экспериментально обнаружил, что с помощью магнита можно получить электрический ток в замкнутой цепи.

Рассмотрим опыты Фарадея, используя современный чувствительный гальванометр. Для этого подсоединим к гальванометру катушку с большим числом витков изолированного провода (рис. 138).

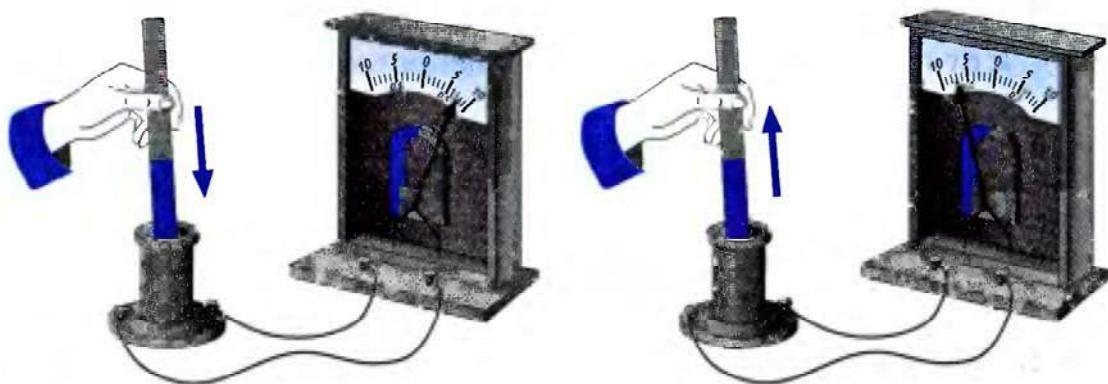


Рис. 138 Возникновение электрического тока в цепи с катушкой при движении постоянного магнита в катушке

Опыт 1. Если начать *вставлять* или *вынимать* магнит из катушки, стрелка гальванометра будет отклоняться от нулевого деления. *При остановке магнита стрелка возвращается к нулевому делению.*

Опыт 2. Отклонение стрелки гальванометра мы будем также наблюдать, если магнит держать неподвижно, а двигать катушку. Если при этом прекратить двигать катушку, то стрелка гальванометра вернётся к нулевому делению.

Отклонение стрелки гальванометра от нулевого деления может быть вызвано только током в катушке.

! Следовательно, в замкнутой цепи, состоящей из гальванометра и катушки, при взаимном перемещении катушки и магнита возникает электрический ток. Если же взаимное перемещение катушки и магнита прекращается, то прекращается и ток.

Явление возникновения тока в замкнутой цепи при относительном движении магнита и цепи называют явлением электромагнитной индукции, а возникающий при этом электрический ток называют индукционным током.

На рис. 138 показано, что при изменении направления движения магнита изменяется направление отклонения стрелки гальванометра. Следовательно, направление возникающего в цепи индукционного тока при этом также изменяется на противоположное.

Опыт 3. Если вдвигать магнит в катушку *разными* полюсами, то стрелка гальванометра отклоняется в разные стороны.



Следовательно, направление возникающего в цепи электрического тока зависит не только от направления движения магнита, но и от того, каким полюсом его вдвигают или вынимают из катушки.

Опыт 4. Явление электромагнитной индукции можно наблюдать и в том случае, если вместо магнита около подключённой к гальванометру катушки перемещать вторую катушку с электрическим током, полученным, например, от аккумулятора.

Опыт 5. При проведении опыта с двумя катушками стрелка гальванометра отклоняется и в том случае, когда обе катушки остаются неподвижными друг относительно друга *при условии, что во второй катушке изменяется сила тока*. Опыт показывает, что при этом сила тока через гальванометр тем больше, чем *быстрее изменяется* сила тока во второй катушке.

Если же ток во второй катушке остаётся неизменным и отсутствует относительное движение катушек, то индукционного тока в первой катушке нет.

Опыт 6. Фарадей обнаружил, что индукционный ток в катушке, подключённой к гальванометру, возникает и тогда, когда эту катушку помещают между полюсами постоянного магнита и начинают либо изменять её ориентацию относительно магнитного поля, либо изменять площадь, ограниченную витками этой катушки (*растягивая и сжимая её*).

Чтобы понять вывод, сделанный Фарадеем из всех своих опытов, напомним, что именно Фарадей придумал способ изображения магнитного поля с помощью силовых линий. Вспомните картины магнитных полей, рассмотренные в § 58. После этого вы вслед за Фарадеем сможете прийти к выводу:



индукционный ток в замкнутой цепи возникает всякий раз, когда изменяется *число магнитных линий, пронизывающих площадь, ограниченную этой цепью*.

Именно такой вывод и был сделан Фарадеем.

Кроме того, Фарадей установил следующее.

Сила индукционного тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна быстроте изменения числа магнитных линий, которые пронизывают площадь, ограниченную этой цепью.

Это утверждение часто называют *законом электромагнитной индукции Фарадея*.

Правило определения направления индукционного тока экспериментально установил в 1833 г. русский физик Эмилий Ленц (1804–1865). Преж-

де чем сформулировать это правило, напомним, что любой электрический ток порождает магнитное поле. Следовательно, индукционный ток также порождает своё магнитное поле.

Правило Ленца:

индукционный ток в замкнутой цепи имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать вызвавшее этот ток изменение числа магнитных линий, которые пронизывают площадь, ограниченную этой цепью.

Открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции доказало неизменную связь между электрическими и магнитными полями. То, что изменяющееся магнитное поле порождает электрическое поле, позволило английскому физику Джеймсу Максвеллу (1831–1879) выдвинуть гипотезу:

изменяющееся электрическое поле должно порождать магнитное поле.

Дальнейшие исследования полностью подтвердили эту гипотезу. Тем самым было доказано, что *изменяющиеся электрическое и магнитное поля не могут существовать отдельно друг от друга*. Из этого был сделан вывод о существовании единого электромагнитного поля.

Созданная Максвеллом теория электромагнитного поля является тем фундаментом, на котором базируется вся современная электро- и радиотехника.

Как уже говорилось, почти 80 % всей электроэнергии, потребляемой человечеством, вырабатывается на электростанциях с помощью электрогенераторов. Действие большинства из них основано на возникновении электрического тока в проводниках замкнутой рамки при её вращении в магнитном поле. Такие электрогенераторы называют индукционными генераторами.

В простейшем случае в качестве такого генератора можно использовать коллекторный электродвигатель. Действительно, если вращать рамку такого двигателя, то в соответствии с законом электромагнитной индукции в её витках, а следовательно, и между щётками возникнет электрическое напряжение. С конструкцией индукционных генераторов вы познакомитесь в старших классах.

Итоги

Всякий раз, когда изменяется число магнитных линий, которые пронизывают площадь, ограниченную замкнутым проводником, в нём возникает электрический ток. Это явление называют явлением электромагнитной индукции, а сам ток — индукционным током.

Закон электромагнитной индукции Фарадея

Сила индукционного тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна быстроте изменения числа магнитных линий, которые пронизывают площадь, ограниченную этой цепью.

Правило Ленца

Индукционный ток в замкнутой цепи имеет такое направление, что создаваемое им магнитное поле стремится компенсировать вызвавшее этот ток изменение числа магнитных линий, которые пронизывают площадь, ограниченную этой цепью.

Явление электромагнитной индукции привело Максвелла к гипотезе о неразрывной связи между электрическим и магнитным полями: *изменяющиеся* электрическое и магнитное поля не могут существовать отдельно друг от друга.

Вопросы

- 1 Расскажите об опытах Фарадея, которые привели к открытию явления электромагнитной индукции.
- 2 В чём состоит явление электромагнитной индукции?
- 3 Какой ток называют индукционным? Когда он возникает? Приведите примеры.
- 4 От чего зависит сила индукционного тока?
- 5 Как определить направление индукционного тока?
- 6 На каком явлении основана работа индукционных генераторов?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Магнитное взаимодействие осуществляется посредством особого вида материи — магнитного поля.

Магнитное поле создаётся любыми движущимися электрическими зарядами (проводниками с током) и постоянными магнитами.

Магнитное поле проявляет себя в действии на движущиеся электрические заряды (проводники с током), намагничивающиеся тела, постоянные магниты.

Магнитная линия — линия, касательная к которой в каждой её точке совпадает с осью установившейся магнитной стрелки, помещённой в эту точку. Направление от южного к северному полюсу этой стрелки принимают за положительное направление на магнитной линии.

Магнитное поле можно описать при помощи его силовой характеристики — индукции магнитного поля, от которой зависит сила действия магнитного поля на проводник с током. Модуль этой силы (силы Ампера) максимальен, когда угол между направлением тока и магнитными линиями равен 90° .

Модулем индукции B магнитного поля называют физическую величину, равную отношению максимального модуля силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник длиной l с током I , к произведению I на l :

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

За направление индукции магнитного поля в данной точке принимают направление магнитной линии в этой точке.

Направление силы Ампера определяют по правилу левой руки.

При изменении числа магнитных линий, пронизывающих площадь, ограниченную замкнутой цепью, в этой цепи возникает индукционный ток. Сила этого тока прямо пропорциональна быстроте изменения числа магнитных линий, которые пронизывают площадь, ограниченную цепью.

Это явление называют явлением электромагнитной индукции.

Лабораторные работы

Измерение физических величин и оценка погрешностей этих измерений

В лабораторных работах, выполняемых в 8 классе, используют два вида измерений: **прямые и косвенные**.

Прямыми называют измерения, при которых значение измеряемой величины получают *непосредственно в результате измерения*. Полученную таким образом величину называют *прямо измеренной*.

Например, длину стороны тетрадного листа можно определить прямым измерением — непосредственно с помощью линейки со шкалой.

Другими словами, значение искомой величины (т. е. во сколько раз эта величина отличается от единицы измерения) получают сразу, считывая показания измерительного прибора.

Косвенными называют измерения, при которых значение измеряемой величины получают *путём расчёта по известной зависимости от прямо измеренных величин*. Полученную таким образом величину называют *косвенно измеренной*.

Например, площадь прямоугольного листа бумаги можно определить косвенным измерением — вычислив произведение прямо измеренных величин — длин сторон этого листа.

Обратим внимание на очень важный момент. В результате практически любого измерения *получить истинное (точное) значение измеряемой величины невозможно*. Другими словами, практически любое измерение производится с погрешностью (ошибкой).

Точность измерения, характеризующую отличие полученного значения интересующей величины от её истинного значения, можно описать с помощью специальных физических величин — *абсолютной погрешности и относительной погрешности*.

Абсолютной погрешностью называют модуль разности измеренного $A_{\text{изм}}$ и истинного A значений:

$$|A_{\text{изм}} - A|. \quad (1)$$

Максимальное значение указанной величины, которое может быть получено при измерении, называют **максимальной абсолютной погрешностью ΔA** .

При выполнении лабораторных работ будем считать, что *погрешность измерения обусловлена в основном двумя причинами*.

Первая причина связана с конечной точностью нанесения штрихов на шкалы измерительных приборов: линеек, транспортиров, мерных мензурок и т. п. Обусловленную указанной причиной ошибку называют *приборной погрешностью*. При этом следует учитывать, что, если специально не оговорено иное, штрихи на шкалы подобных приборов нанесены так, что *приборная погрешность измерения не превышает половины цены деления в любом месте шкалы*.

Вторая причина связана с недостаточной точностью отсчёта экспериментатором показаний со шкал приборов. Обусловленную этой причиной ошибку называют *погрешностью отсчёта*. Принято считать, что *погрешность отсчёта не превышает половины цены деления шкалы прибора*.

! Обычно считают, что максимальная абсолютная погрешность ΔA при прямом измерении равна сумме приборной погрешности и погрешности отсчёта, т. е. равна цене деления шкалы прибора.

Как вы понимаете, при проведении измерений нам не известны ни истинное значение A измеряемой величины, ни абсолютная погрешность $|A_{\text{изм}} - A|$. Поэтому при записи результата измерения используют значение максимальной абсолютной погрешности ΔA . Считают, что истинное значение измеряемой величины *не больше* измеренного значения $A_{\text{изм}}$ на величину ΔA (т. е. $A \leq A_{\text{изм}} + \Delta A$) и что оно *не меньше* измеренного значения $A_{\text{изм}}$ на величину ΔA (т. е. $A \geq A_{\text{изм}} - \Delta A$).

Результат измерения записывают в виде интервала:

$$A_{\text{изм}} - \Delta A \leq A \leq A_{\text{изм}} + \Delta A, \quad (2)$$

где $A_{\text{изм}}$ – измеренное значение, а ΔA – максимальная абсолютная погрешность (рис. 139).

Иногда результат измерения записывают в виде:

$$A = A_{\text{изм}} \pm \Delta A. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) означают, что истинное значение измеряемой величины находится в указанном интервале.

Интервал, в котором может находиться истинное значение измеряемой величины



Рис. 139

Например, если при измерении длины L отрезка с помощью линейки с ценой деления 1 мм было получено значение 73 мм, то результат измерения может быть записан в виде:

$$L = (73 \pm 1) \text{ мм}$$

либо

$$72 \text{ мм} \leq L \leq 74 \text{ мм.}$$

Это означает, что истинное значение измеряемой величины может оказаться любым в интервале от 72 до 74 мм.

Отметим, что ни в коем случае недопустимо указывать значение измеренной величины с точностью, превышающей максимальную абсолютную погрешность.

При обработке результатов измерений пользуются также *максимальной относительной погрешностью*. Она показывает, какую долю от измеренной величины составляет максимальная абсолютная погрешность.

Максимальной относительной погрешностью называют отношение максимальной абсолютной погрешности к модулю измеренного значения:

$$\epsilon = \frac{\Delta A}{|A_{\text{изм}}|}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что максимальная относительная погрешность является безразмерной величиной.

Часто максимальную относительную погрешность выражают в процентах. В этом случае выражение (4) записывают в виде:

$$\epsilon = \frac{\Delta A}{|A_{\text{изм}}|} \cdot 100 \%. \quad (5)$$

Косвенные измерения проводят по следующей схеме.

Пусть, например, необходимо определить значение величины f , которое можно рассчитать по известной формуле, если знать прямо измеряемые величины x и y .

Шаг 1. Выполняют прямые измерения величин x и y . Результаты этих измерений записывают с указанием максимальных абсолютных погрешностей (Δx и Δy) и максимальных относительных погрешностей ($\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}}$ и $\epsilon_y = \frac{\Delta y}{y_{\text{изм}}}$).

Шаг 2. Используя измеренные значения x и y , рассчитывают косвенно измеренное значение $f_{\text{изм}}$ искомой величины f .

Шаг 3. Расчёт максимальной абсолютной Δf и максимальной относительной ϵ_f погрешностей величины f проводят с учётом формулы для расчёта величины f (см. табл. 12).

Таблица 12

Вид формулы для расчёта f	Максимальная абсолютная погрешность Δf	Максимальная относительная погрешность ϵ_f
$f = x + y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\epsilon_f = \frac{\Delta f}{f}$
$f = x - y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\epsilon_f = \frac{\Delta f}{f}$
$f = x \cdot y$	$\Delta f = x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x$	$\epsilon_f = \epsilon_x + \epsilon_y$
$f = \frac{x}{y}$	$\Delta f = \frac{x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x}{y^2}$	$\epsilon_f = \epsilon_x + \epsilon_y$
$f = k \cdot x$	$\Delta f = k \cdot \Delta x$	$\epsilon_f = k \cdot \epsilon_x$

В последней строке таблицы число k считается точным, а Δx – максимальная абсолютная погрешность прямо измеряемой величины x .

Шаг 4. Записывают результат измерения f в виде интервала:

$$f_{\text{изм}} - \Delta f \leq f \leq f_{\text{изм}} + \Delta f \quad (4)$$

либо

$$f = f_{\text{изм}} \pm \Delta f. \quad (5)$$

Шаг 5. Записывают максимальную относительную погрешность.

Отметим, что рассчитанные значения Δf и ϵ_f следует округлять до одной значащей цифры. После этого следует округлить рассчитанное значение $f_{\text{изм}}$ до той же значащей цифры, что и Δf .

Пример

Пусть при измерении сторон прямоугольника линейкой с ценой деления 1 мм получены значения: $x_{\text{изм}} = 25$ мм, $y_{\text{изм}} = 14$ мм. В этом случае с учётом максимальной абсолютной погрешности результаты прямых измерений сторон прямоугольника могут быть записаны в виде: $x = (25 \pm 1)$ мм; $y = (14 \pm 1)$ мм. Максимальные относительные погрешности $\epsilon_x = \frac{\Delta x}{x_{\text{изм}}} = \frac{1}{25} = 0,04$; $\epsilon_y = \frac{\Delta y}{y_{\text{изм}}} = \frac{1}{14} = 0,07$.

Используя измеренные значения сторон, рассчитаем косвенно измеренное значение площади прямоугольника: $S_{\text{изм}} = x_{\text{изм}} \cdot y_{\text{изм}} = 25 \cdot 14 = 350$ (мм^2).

Рассчитаем максимальную абсолютную погрешность ΔS и максимальную относительную погрешность ϵ_S , используя формулы табл. 12:

$$\Delta S = x \cdot \Delta y + y \cdot \Delta x = 25 \cdot 1 + 14 \cdot 1 = 39 \text{ (мм}^2\text{);}$$

$$\epsilon_S = \epsilon_x + \epsilon_y = 0,04 + 0,07 = 0,11.$$

Согласно сказанному, значение максимальной абсолютной погрешности следует округлить до одной значащей цифры: $\Delta S \approx 0,4 \cdot 10^2$ мм. После этого до той же значащей цифры округляем косвенно измеренное значение площади: $S_{\text{изм}} = 350 \text{ мм}^2 = 3,5 \cdot 10^2 \text{ мм}^2$.

Записываем результат измерения площади прямоугольника:

$$S_{\text{изм}} = (3,5 \pm 0,4) \cdot 10^2 \text{ мм}^2.$$

Лабораторная работа № 1

Исследование изменения температуры остывающей воды во времени

Цели работы: сравнить скорости изменения температур остивающей воды в стакане и калориметре; установить качественную зависимость скорости изменения температуры воды от разности её температуры и температуры окружающей среды; сопоставить скорости теплообмена воды в стакане и калориметре с окружающей средой.

Оборудование: калориметр (или термос), мензурка, термометр, стакан, суд с горячей водой, часы.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 11–13.

Калориметр — устройство, которое позволяет уменьшить теплообмен содержимого внутреннего сосуда с окружающей калориметр средой. Калориметр состоит из двух сосудов, разделённых воздушным промежутком. Дно внутреннего сосуда обычно отделено от дна внешнего сосуда теплоизолирующей подставкой. Часто внутреннюю поверхность внутреннего сосуда делают блестящей, чтобы уменьшить теплообмен за счёт излучения.

После погружения термометра в воду для установления теплового равновесия требуется не менее 40 с. Поэтому для измерения температуры в интересующий нас момент времени следует опускать термометр в воду заранее.

Порядок выполнения работы

1. Измерьте температуру воздуха и запишите её в тетрадь.

- При помощи мензурки отмерьте 100 мл горячей воды и перелейте её в стакан.
- Измерьте температуру воды в стакане и запишите полученное значение в первую клетку второй строки таблицы. Считайте этот момент началом отсчёта времени для измерения температуры воды в стакане.
- При помощи мензурки отмерьте 100 мл горячей воды и перелейте её в калориметр.
- Измерьте температуру воды во внутреннем сосуде калориметра и запишите полученное значение в первую клетку третьей строки таблицы. Считайте этот момент началом отсчёта времени для измерения температуры воды в калориметре.
- Повторяйте измерения из п. 3 и 5 через каждые 5 мин, пока не заполните все клетки таблицы.

Время, мин	0	5	10	15	20
Температура воды в стакане, °C					
Температура воды в калориметре, °C					

- На миллиметровой бумаге нарисуйте оси для построения графика зависимости температуры воды в стакане от времени.
- Поставьте точки, соответствующие результатам измерений.
- Отметьте у каждой точки интервал, соответствующий погрешности измерения температуры (равный цене деления шкалы термометра).
- Проведите плавную кривую так, чтобы она пересекала все соответствующие интервалы, отмеченные в п. 9.
- На том же листе, но другим цветом постройте график зависимости температуры воды в калориметре от времени, повторив п. 8–10 работы. Сопоставив построенные графики, запишите ответы на вопросы.

Вопросы

- Как изменяются с течением времени (увеличиваются, уменьшаются или остаются неизменными) температуры воды в стакане и калориметре? Какие явления объясняют эти изменения?
- Различаются ли скорости изменения температур воды в стакане и калориметре? Где вода остывает быстрее? Почему?
- Как вы думаете, чему будут равны температуры воды в стакане и калориметре через достаточно большой промежуток времени?
- Оцените, как меняется с течением времени (замедляется, увеличивается) скорость изменения температуры воды в стакане? Связано ли это с изменением разности температур воды и окружающей среды?

Лабораторная работа № 2

Сравнение количеств теплоты при теплообмене

Цели работы: изучить процесс теплообмена и установления теплового (термодинамического) равновесия в полностью изолированной термодинамической системе; проверить справедливость уравнения теплового баланса.

Оборудование: мензурка, калориметр (или термос), термометр, сосуды с холодной и горячей водой.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 14 и 15. После погружения термометра в воду его показания следует считывать не менее чем через 40 с.

Порядок выполнения

1. При помощи мензурки отмерьте 100 мл горячей воды и перелейте её в калориметр.
2. Измерьте температуру t_1 горячей воды в калориметре и запишите полученное значение в таблицу в виде интервала $t_1 \pm \Delta t$, где Δt — максимальная абсолютная погрешность определения температуры, равная цене деления шкалы термометра.
3. Налейте в мензурку 150 мл холодной воды.
4. Измерьте температуру t_2 холодной воды в мензурке. Запишите измеренное значение в таблицу в виде интервала $t_2 \pm \Delta t$.
5. Перелейте холодную воду в калориметр с горячей водой.
6. Считая плотность горячей и холодной воды одинаковой и равной $\rho = 1 \text{ г}/\text{см}^3$, рассчитайте массы горячей m_1 и холодной m_2 воды. Учитывая погрешность измерения объёма воды мензуркой (равную цене деления шкалы мензурки), определите погрешность Δm измерения массы воды. Запишите результаты в таблицу в виде интервалов.
7. Дождитесь установления теплового равновесия в калориметре. Измерьте установившуюся температуру воды. Запишите её значение в таблицу в виде интервала $t \pm \Delta t$.

Масса горячей воды $m_1 \pm \Delta m, \text{ г}$	Температура горячей воды $t_1 \pm \Delta t, ^\circ\text{C}$	Масса холодной воды $m_2 \pm \Delta m, \text{ г}$	Температура холодной воды $t_2 \pm \Delta t, ^\circ\text{C}$	Установившаяся температура воды в калориметре $t \pm \Delta t, ^\circ\text{C}$

8. Рассчитайте количество теплоты Q_1 , которое отдала горячая вода:
$$Q_1 = c \cdot m_1 \cdot (t_1 - t),$$
 где c — удельная теплоёмкость воды. Значение удельной теплоёмкости воды возьмите из таблицы 2 в § 14.
9. Рассчитайте количество теплоты Q_2 , полученное холодной водой:
$$Q_2 = c \cdot m_2 \cdot (t - t_2).$$
10. Сравните значения Q_1 и Q_2 . Сформулируйте вывод и запишите его.
- 11*. Рассчитайте максимальные абсолютные погрешности измерения Q_1 и Q_2 по формулам (см. таблицу расчёта погрешностей косвенных измерений): $\Delta Q_1 = c \cdot [m_1 \cdot 2\Delta t + (t_1 - t) \cdot \Delta m]$ и $\Delta Q_2 = c \cdot [m_2 \cdot 2\Delta t + (t - t_2) \cdot \Delta m]$. Округлите рассчитанные значения до одной значащей цифры.
- 12*. Округлите полученные в п. 8 и 9 значения до того же разряда, до которого вы округлили значения погрешностей в п. 11*.
- 13*. Нарисуйте в тетради горизонтальную числовую ось. Изобразите на оси синим цветом интервал, в пределах которого находится истинное значение Q_1 . Изобразите на этой же оси чёрным цветом интервал, в пределах которого находится истинное значение Q_2 .
- 14*. По результатам выполнения п. 13* сформулируйте и запишите вывод.

Вопросы

- Из каких тел состоит термодинамическая система, рассматриваемая в данной работе? Можно ли считать эту термодинамическую систему полностью изолированной? Почему?
- Почему при смешивании горячей воды с холодной температура горячей воды уменьшается, а холодной увеличивается?
- Какое уравнение называют уравнением теплового баланса?

Лабораторная работа № 3

Измерение удельной теплоёмкости вещества

Цели работы: определить удельную теплоёмкость вещества металлического цилиндра.

Оборудование: мензурка, калориметр (или термос), термометр, весы с набором гирь (или динамометр), металлический цилиндр на нити, сосуды с холодной и горячей водой.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 14, 15.

Порядок выполнения

- При помощи весов (или динамометра) определите массу m_2 металлического цилиндра. Результат измерения запишите в таблицу в виде интервала $m_2 \pm \Delta m$, где Δm — максимальная абсолютная погрешность определения массы.
- Опустите цилиндр на нитке в сосуд с горячей водой.
- При помощи мензурки отмерьте 100 мл холодной воды и перелейте её в калориметр.
- Измерьте температуру t_1 воды в калориметре и запишите полученное значение в таблицу в виде интервала $t_1 \pm \Delta t$, где Δt — максимальная абсолютная погрешность определения температуры, равная цене деления шкалы термометра.
- Считая плотность воды равной $\rho = 1 \text{ г/см}^3$, рассчитайте массу m_1 воды в калориметре. Учитывая погрешность измерения объёма воды мензуркой (равную цене деления шкалы мензурки), определите погрешность Δm измерения массы воды. Запишите результат в таблицу в виде интервала $m_1 \pm \Delta m$.
- Измерьте температуру t_2 воды, в которую помещён цилиндр, считая, что к этому моменту цилиндр и вода имеют одинаковую температуру. Эту температуру будем считать начальной температурой цилиндра. Запишите её значение в таблицу в виде интервала $t_2 \pm \Delta t$.
- Достаньте нагретый цилиндр из горячей воды и опустите его в холодную воду в калориметре.
- Дождитесь установления теплового равновесия в калориметре. Измерьте установившуюся температуру воды и цилиндра. Запишите её значение в таблицу в виде интервала $t \pm \Delta t$.

Масса воды в калориметре $m_1 \pm \Delta m$, г	Начальная температура воды $t_1 \pm \Delta t$, °C	Масса цилиндра $m_2 \pm \Delta m$, г	Начальная температура цилиндра $t_2 \pm \Delta t$, °C	Общая температура воды и цилиндра $t \pm \Delta t$, °C

- Количество теплоты Q_1 , которое получила вода при нагревании:

$$Q_1 = c_1 \cdot m_1 \cdot (t - t_1),$$

где c_1 — удельная теплоёмкость воды.

Количество теплоты Q_2 , отданное металлическим цилиндром при охлаждении:

$$Q_2 = c_2 \cdot m_2 \cdot (t_2 - t),$$

где c_2 — искомая удельная теплоёмкость вещества цилиндра.

Будем считать, что количество теплоты, полученное водой при нагревании, равно количеству теплоты, отданному цилиндром при охлаждении.

Поэтому:

$$Q_1 = Q_2$$

$$\text{Отсюда } c_2 = \frac{c_1 \cdot m_1 \cdot (t - t_1)}{m_2 \cdot (t_2 - t)}.$$

Используя результаты измерений, рассчитайте значение искомой удельной теплоёмкости. Значение удельной теплоёмкости воды возьмите из таблицы 2 в § 14.

10. Используя данные таблицы 2 в § 14, определите вещество, из которого мог быть изготовлен цилиндр.

Вопросы

1. Из каких тел состоит термодинамическая система, рассматриваемая в данной работе? Считаем ли мы эту термодинамическую систему теплоизолированной?
2. Как зависит теплоёмкость однородного тела от его массы и удельной теплоёмкости его вещества?
- 3*. Как изменится найденное значение удельной теплоёмкости исследуемого вещества, если в расчётах учесть теплоёмкость внутреннего сосуда калориметра и теплообмен с окружающей средой?

Лабораторная работа № 4

Измерение влажности воздуха

Цели работы: научиться измерять относительную влажность воздуха с помощью психрометра.

Оборудование: термометр, кусочек ткани, стакан с водой комнатной температуры и психрометрическая таблица.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 17–19. Обратите внимание на то, что психрометр состоит из двух термометров, у одного из которых колбочка с рабочим веществом обмотана тканью, смачиваемой водой.

Порядок выполнения работы

- Измерьте температуру t воздуха в классе и запишите её в тетрадь.
- Смочите кусочек ткани водой из стакана. Обмотайте колбочку термометра этой тканью.
- После этого положите термометр на стол и дождитесь окончания понижения его показания. Запишите установившееся значение температуры $t_{вл}$ влажного термометра в тетрадь.
- Рассчитайте разность Δt температур сухого t и влажного $t_{вл}$ термометров.
- С помощью психрометрической таблицы определите относительную влажность воздуха в классе.

Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °C	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Относительная влажность, %											
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	46	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

Вопросы

1. Как изменяется относительная влажность воздуха в комнате, если при неизменной температуре воздуха показания влажного термометра увеличиваются? Объясните ответ.
2. Как изменилась относительная влажность воздуха в комнате, если показания сухого и влажного термометров увеличились на одну и ту же величину? Объясните ответ, используя: а) психрометрическую таблицу; б) ваши знания о зависимости скорости испарения воды от влажности окружающего воздуха.

Лабораторная работа № 5

Сборка электрической цепи и измерение силы тока в её различных участках

Цели работы: научиться собирать электрические цепи, состоящие из нескольких последовательно соединённых элементов; убедиться на опыте, что сила тока в различных участках неразветвлённой цепи одинакова.

Оборудование: низковольтный источник питания (например, батарейка от карманного фонаря), лампа на подставке, ключ, амперметр, соединительные провода.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 45, 46 и 49.

Для измерения силы тока в заданном участке цепи в нём делают разрыв. Концы проводников в месте разрыва соединяют с клеммами амперметра, соблюдая полярность. Таким образом, амперметр включают в цепь последовательно. Сила тока в цепи после включения амперметра уменьшится незначительно, если сопротивление амперметра будет значительно меньше суммарного сопротивления остальных участков цепи.

Внимание! Подключать амперметр непосредственно к клеммам источника запрещается! Ключ можно замыкать только после проверки правильности соединения элементов цепи!

Порядок выполнения работы

1. Рассмотрите амперметр и источник питания. Обратите внимание на знаки «+» и «-» на их клеммах.

2. Определите цену деления шкалы амперметра и запишите это значение в тетрадь. Считайте, что максимальная абсолютная погрешность измерения силы тока равна этому значению.
3. Нарисуйте схему электрической цепи, состоящую из последовательно соединённых источника питания, лампочки, амперметра и ключа. Укажите на ней стрелками направления электрического тока в каждом участке.
4. Соберите схему. Соедините проводом один из выводов лампы с клеммой амперметра, обозначенной знаком «—». Другую клемму амперметра соедините с одной из клемм разомкнутого ключа. Соедините свободную клемму разомкнутого ключа с положительным полюсом «+» источника. Соедините свободную клемму лампы с отрицательным полюсом «—» источника. Проверьте правильность соединения элементов цепи, в том числе полярность включения амперметра.
5. Замкните ключ и запишите в тетрадь показание амперметра с учётом погрешности. После этого разомкните ключ.
6. Соберите электрическую цепь, состоящую из последовательно соединённых источника питания, разомкнутого ключа, лампы и амперметра. К положительному полюсу «+» источника подключите свободную клемму ключа (в разомкнутом состоянии), к отрицательному полюсу «—» источника — другой конец цепи: отрицательную клемму амперметра. Зарисуйте в тетради соответствующую электрическую схему. Проверив правильность соединения элементов, выполните задания из п. 5.
7. Соберите электрическую цепь, состоящую из последовательно соединённых источника питания, амперметра, разомкнутого ключа и лампы. К положительному полюсу «+» источника подключите соответствующую клемму амперметра, к отрицательному полюсу «—» источника — другой конец цепи: свободную клемму лампы. Зарисуйте в тетради соответствующую электрическую схему. Проверив правильность соединения элементов, выполните задания из п. 5.
После этого разберите цепь.
8. Сравните три схемы электрической цепи. Чем они различаются? Сравните измеренную силу тока в каждой из цепей с учётом погрешности измерений. Сформулируйте вывод и запишите его в тетрадь.

Вопросы

1. Как включают амперметр в электрическую цепь?
2. Различается ли сила тока в разных местах неразветвлённой электрической цепи? Почему?
3. Почему запрещается подключать клеммы амперметра непосредственно к клеммам источника?

Лабораторная работа № 6

Измерение напряжения между двумя точками электрической цепи

Цели работы: научиться измерять напряжение между двумя точками электрической цепи; убедиться на опыте, что общее напряжение при последовательном соединении проводников равно сумме напряжений на каждом из них.

Оборудование: низковольтный источник питания, две лампы на подставках (или два реостата), ключ, вольтметр, соединительные провода.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 46 и 49.

Для измерения напряжения между двумя точками электрической цепи клеммы вольтметра следует подключать, не разрывая цепь, к этим точкам при помощи соединительных проводов. Таким образом, вольтметр подключают *параллельно* участку цепи, между концами которого измеряют напряжение.

Соблюдайте полярность при подключении!

Внимание! Ключ можно замыкать только после проверки правильности соединения элементов цепи!

Порядок выполнения работы

1. Рассмотрите вольтметр и источник питания. Обратите внимание на знаки «+» и «-» у их клемм.
2. Определите цену деления шкалы вольтметра и запишите её значение в тетрадь. Считайте, что максимальная абсолютная погрешность измерения напряжения равна этому значению. Записывайте результаты измерения напряжения с учётом этой погрешности.
3. Рассмотрите монтажную схему электрической цепи, изображённую на рис. 140. Обратите внимание на полярность подключения вольтметра. Нарисуйте в тетради соответствующую электрическую схему. Укажите

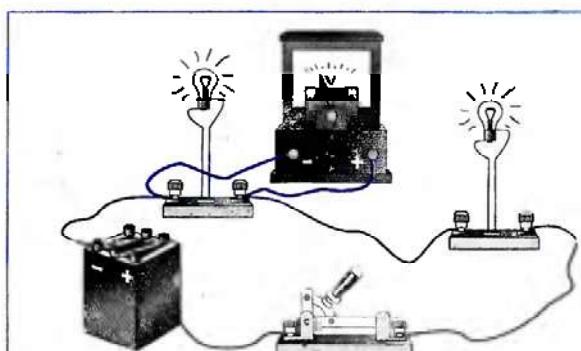


Рис. 140

на ней стрелками направления электрического тока в каждом из участков.

4. Соберите цепь с разомкнутым ключом в соответствии с рис. 140. Проверьте правильность соединения элементов цепи.
5. Замкните ключ и запишите в тетрадь показание U_1 вольтметра. После этого разомкните ключ.
6. Отключите клеммы вольтметра от первой лампы, подключите прибор, соблюдая полярность, ко второй лампе. Зарисуйте в тетради соответствующую электрическую схему. Проверив правильность соединения элементов, замкните ключ и запишите в тетрадь показание U_2 вольтметра. После этого разомкните ключ.
7. Отключите клеммы вольтметра от второй лампы. Подключите прибор, соблюдая полярность, к концам участка цепи, содержащего последовательно соединённые первую и вторую лампы. Зарисуйте в тетради соответствующую электрическую схему. Проверив правильность соединения элементов, замкните ключ и запишите в тетрадь показание U вольтметра. После этого разомкните ключ.
- 8*. Соблюдая полярность, подключите вольтметр к клеммам источника. Запишите в тетрадь показание U_{ii} вольтметра. После этого замкните ключ. Запишите в тетрадь показание U_{ii2} вольтметра.
9. Разомкните ключ и разберите схему.
10. Вычислите сумму напряжений $U_1 + U_2$. Сравните её с напряжением U с учётом погрешностей измерений. Сформулируйте вывод и запишите его в тетрадь.
- 11*. Сравните показания вольтметра из п. 8. Сформулируйте вывод и запишите его в тетрадь.
- 12*. Используя данные п. 8 и 10, рассчитайте напряжение между клеммами замкнутого ключа.

Вопросы

1. Как подключают вольтметр для измерения напряжения между двумя точками цепи?
2. Различаются ли напряжения между разными точками неразветвлённой электрической цепи? Почему?
3. Чему равно общее напряжение между концами участка цепи, содержащего последовательно соединённые проводники?

Лабораторная работа № 7

Изменение силы тока в электрической цепи с помощью реостата и определение сопротивления проводника при помощи амперметра и вольтметра

Цели работы: научиться изменять силу тока в электрической цепи с помощью реостата и определять сопротивление проводника при помощи амперметра и вольтметра. Убедиться на опыте в справедливости закона Ома.

Оборудование: низковольтный источник питания, резистор (например, отрезок AB спирали, закреплённый на щите), реостат, ключ, вольтметр, амперметр, соединительные провода, линейка с миллиметровыми делениями.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 46–49.

Порядок выполнения работы

1. Рассмотрите вольтметр, амперметр и источник питания. Обратите внимание на знаки «+» и «-» у их клемм.
2. Определите цены делений шкал вольтметра и амперметра. Запишите их значения в тетрадь. Считайте, что эти величины равны абсолютным максимальным погрешностям измерений с помощью этих приборов.
3. Соберите схему электрической цепи, состоящую из последовательно соединённых источника питания, резистора (спирали AB), амперметра, ключа и реостата. Точку A резистора (спирали) подключите к отрицательному полюсу «-» источника, свободную клемму реостата — конец его обмотки — подключите к положительному полюсу «+» источника. Вольтметр подключите к концам спирали — точкам A и B , соблюдая полярность при подключении прибора. Ключ должен находиться в разомкнутом состоянии.

Нарисуйте в тетради соответствующую электрическую схему. Укажите на ней (стрелками) направления электрического тока в каждом из участков.

4. Установите ползунок реостата так, чтобы сопротивление реостата было максимальным. Измерьте линейкой расстояние между краями металлических колец, к которым подключена обмотка реостата. Полученное значение, равное координате ползунка, запишите в первый столбец таблицы.
5. Проверьте правильность соединения элементов цепи. Замкните ключ. Запишите в таблицу показание I амперметра и U вольтметра.

6. Уменьшите сопротивление реостата, передвинув ползунок на $\frac{1}{4}$ длины обмотки к её началу. Запишите новую координату ползунка реостата и показания приборов в соответствующие клетки следующей строки таблицы.
7. Повторяйте п. 6, пока не заполните остальные строки таблицы.
8. Разомкните ключ и разберите схему.

Координата ползунка реостата, мм	Сила тока I , А	Напряжение U , В	Сопротивление спирали R_{AB} , Ом
0			

9. Анализируя экспериментальные данные из таблицы, ответьте на вопрос: изменяется ли сила тока в цепи при изменении числа включённых в цепь витков обмотки реостата? Ответ запишите в тетрадь.
10. Анализируя экспериментальные данные из таблицы, ответьте на вопрос: изменяется ли напряжение между концами спирали AB при изменении силы тока в цепи? Ответ запишите в тетрадь.
11. Постройте график зависимости напряжения U между концами спирали AB от силы тока I в цепи.
12. Используя закон Ома, вычислите сопротивление спирали AB по данным каждого измерения. Полученные результаты запишите в последний столбец таблицы. Сравните их. Сформулируйте вывод и запишите его.
- 13*. Рассчитайте максимальные абсолютные погрешности косвенного измерения R_{AB} по результатам каждого эксперимента по формуле (см. таблицу расчёта погрешностей косвенных измерений):

$$\Delta R_{AB} = \frac{U \cdot \Delta I + I \cdot \Delta U}{I^2}$$
. Округлите рассчитанные значения до одной значащей цифры.
- 14*. Округлите полученные в п. 12 значения до того же разряда, до которого вы округлили значения погрешностей в п. 13*. Полученные результаты запишите в виде интервалов в тетрадь.
- 15*. Нарисуйте в тетради горизонтальную числовую ось. Изобразите под ней интервалы, в пределах которых находятся истинные значения R_{AB} по результатам каждого опыта. Сформулируйте вывод и запишите его.

Вопросы

1. Как изменяется сопротивление реостата при изменении числа включённых в цепь витков его обмотки?
2. Как изменяется сила тока в цепи при увеличении (уменьшении) сопротивления реостата, включённого в эту цепь последовательно?
3. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
4. Что называют сопротивлением участка цепи?

Лабораторная работа № 8

Измерение работы и мощности электрического тока

Цели работы: определить работу и мощность электрического тока при нагревании воды в калориметре; проверить справедливость уравнения теплового баланса.

Оборудование: калориметр, мензурка, вода, источник тока, вольтметр, амперметр, реостат, никромовая спираль, соединительные провода, секундомер, термометр.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 14, 15, 51 и 52.

Порядок выполнения работы

1. При помощи мензурки отмерьте объём $V = 100$ мл воды и перелейте её во внутренний сосуд калориметра. Результат измерения объёма запишите в тетрадь с указанием абсолютной максимальной погрешности ΔV .
2. Соедините клемму разомкнутого ключа с положительным полюсом «+» источника. Вторую клемму разомкнутого ключа соедините с клеммой «+» амперметра. Вторую клемму амперметра соедините с металлическим стержнем, по которому перемещается ползунок реостата. Установите ползунок реостата так, чтобы его сопротивление было максимальным. Ко второй клемме реостата с помощью соединительных проводов подключите один из концов никромовой спирали и клемму вольтметра со знаком «+». Второй конец никромовой спирали и клемму вольтметра со знаком «-» подключите соединительными проводами к отрицательному полюсу источника. Полностью погрузите никромовую спираль в воду в калориметре. Туда же опустите термометр. Зарисуйте в тетради электрическую схему собранной цепи.

3. Запишите цену деления для шкал амперметра, вольтметра и термометра. Считайте, что эти величины равны абсолютным максимальным погрешностям измерений для этих приборов.
4. Проверьте правильность соединения элементов цепи. Запишите показание термометра. Замкните ключ. Перемещая ползунок реостата, установите силу тока в цепи $I = 0,5$ А. Включите секундомер. Запишите в тетради показания амперметра I и вольтметра U .
5. Аккуратно помешивая воду в калориметре термометром, следите за изменением её температуры. Измерьте время τ , за которое вода в калориметре нагреется на $\delta t = 15$ К. Результат измерения запишите в тетрадь.
6. Разомкните ключ и разберите схему.
7. Вычислите количество теплоты, которое получила вода при нагревании: $Q = c \cdot \rho \cdot V \cdot \delta t$. Считайте, что удельная теплоёмкость воды равна $c = 4,2$ Дж/(г · К), а её плотность $\rho = 1,0$ г/см³.
8. Вычислите работу, которую совершил электрический ток при протекании по никромовой спирали за время τ , по формуле: $A = I \cdot U \cdot \tau$. Рассчитайте мощность электрического тока по формуле: $N = I \cdot U$. Запишите результаты.
9. Считая, что работа A тока равна количеству теплоты, переданному воде, сравните эту величину с количеством теплоты Q , полученным водой. Сформулируйте вывод о соотношении этих величин и запишите его.
- 10*. Считая, что максимальная абсолютная погрешность измерения времени пренебрежимо мала, вычислите абсолютные максимальные погрешности величин Q и A по формулам (см. таблицу расчёта погрешностей косвенных измерений): $\Delta Q = c \cdot \rho \cdot [V \cdot \Delta(\delta t) + \delta t \cdot \Delta V]$ и $\Delta A = (\Delta I \cdot U + \Delta U \cdot I) \cdot \tau$. Округлите рассчитанные значения погрешностей до одной значащей цифры.
- 11*. Округлите полученные в п. 7 и 8 значения до того же разряда, что и значения погрешностей в п. 10*. Полученные результаты запишите в виде интервалов в тетрадь.
- 12*. Нарисуйте в тетради горизонтальную числовую ось. Изобразите на ней синим цветом интервал, в пределах которого находится истинное значение Q , а чёрным цветом интервал, в пределах которого находится истинное значение A . Сформулируйте вывод и запишите его.

Вопросы

1. Что называют работой тока на данном участке цепи?
2. Что называют удельной теплоёмкостью вещества?
3. Выполняется ли уравнение теплового баланса в проведённом вами эксперименте?
- 4*. Укажите причины, которые могут привести к нарушению соотношения $A = Q$.

Лабораторная работа № 9

Сборка и изучение действия электромагнита

Цели работы: собрать из готовых деталей электромагнит; определить полярность магнитных полюсов при заданном направлении тока в обмотке; изучить характер зависимости силы действия электромагнита на стрелку компаса от расстояния между ними, от силы тока и наличия сердечника.

Оборудование: источник тока, реостат, ключ, амперметр, соединительные провода, компас, катушка, магнитно-мягкий железный сердечник.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 56, 58, 61 и 62.

Порядок выполнения работы

1. Положите на стол компас. Рядом с ним расположите катушку с проволокой без сердечника так, чтобы её ось совпадала с линией восток — запад.
2. При помощи соединительных проводов подключите последовательно к источнику тока реостат, разомкнутый ключ, амперметр и катушку с проволокой. Проверьте, правильно ли включён в цепь амперметр. Ползунок реостата установите в такое положение, при котором сопротивление реостата максимально. Зарисуйте в тетради схему собранной цепи. Изобразите чёрным цветом стрелку компаса в установленвшемся положении.
3. Замкните ключ. На схеме в тетради укажите стрелками направление тока в каждом из участков. На ранее сделанном рисунке другим цветом изобразите стрелку компаса в новом установленвшемся положении. По положению стрелки определите полярности магнитных полюсов катушки. Обозначьте их на рисунке. Разомкните ключ.
4. Не изменяя положения катушки, измените полярность подключения её концов, изменив тем самым направление тока в её обмотке. Замкните ключ. По новому установленвшемуся положению стрелки компаса убедитесь в том, что полярности магнитных полюсов катушки изменились на противоположные. Разомкните ключ.
5. Сопоставьте результаты проведённых опытов. Используя правило буравчика, определите направление намотки витков проволоки в катушке.
6. Замкните ключ. Медленно поступательно перемещайте компас по столу, удаляя его от катушки. Наблюдайте изменение ориентации стрелки компаса. Когда это изменение станет достаточно заметным, прекратите двигать компас. Разомкните ключ. Сформулируйте и запишите в тетрадь вы-

- вод о характере изменения индукции магнитного поля, созданного катушкой, при неизменной силе тока в ней и изменении расстояния до неё.
7. Замкните ключ. Не изменяя положения компаса и катушки, с помощью реостата медленно увеличивайте силу тока в цепи. Наблюдайте за поведением стрелки компаса. Когда сила тока в цепи увеличится в два-три раза, разомкните ключ. Сформулируйте и запишите в тетрадь вывод о характере зависимости индукции магнитного поля, созданного катушкой, от силы тока в ней.
 8. Переместите ползунок реостата так, чтобы его сопротивление стало максимальным. Замкните ключ. Запомните установившееся положение стрелки компаса. Следите за изменениями ориентации стрелки при всех последующих действиях и фиксируйте их в тетради. Разомкните ключ. Вставьте в катушку сердечник. Замкните ключ. Разомкните его. Сформулируйте и запишите вывод об изменении индукции магнитного поля, созданного катушкой, обусловленное наличием в ней сердечника из магнитно-мягкого железа.
 9. Разберите схему.

Вопросы

1. Где находится северный магнитный полюс Земли?
2. Перечислите источники магнитных полей, действие которых определяет ориентацию стрелки компаса в проведённых экспериментах.
3. Сформулируйте правило буравчика.
- 4*. Объясните влияние сердечника на созданное катушкой магнитное поле, используя гипотезу Ампера.

Лабораторная работа № 10

Изучение явления электромагнитной индукции

Цели работы: изучить явление электромагнитной индукции.

Оборудование: гальванометр (миллиамперметр) с нулевым делением в середине шкалы, полосовой (или дуговой) магнит, штатив с лапкой; соединительные провода, катушка с проводом, которую можно надевать на магнит.

Дополнительные сведения

Повторите материал, изложенный в § 63, и материал о гальванометре из § 60.

Порядок выполнения работы

Подключите катушку к гальванометру. Удерживая катушку неподвижной (см. рис. 138 из § 63), наблюдайте за направлением отклонения стрелки гальванометра при: а) введении северного полюса магнита в катушку; б) покоящемся в катушке магните; в) извлечении магнита. Результаты каждого опыта запишите в тетрадь.

Повторите п. 1, двигая магнит значительно быстрее. Результаты опытов запишите в тетрадь, отметив, изменилось ли (и если изменилось, то как) максимальное отклонение стрелки гальванометра по сравнению с экспериментами из п. 1.

Повторите п. 1 и 2, вводя в катушку южный полюс магнита. Отметьте, изменились ли направления отклонений стрелки гальванометра по сравнению с предыдущими экспериментами.

На основании проведённых экспериментов сформулируйте выводы и запишите их. В выводах отметьте, зависит ли (и если зависит, то как): а) величина отклонения стрелки гальванометра от скорости движения магнита; б) направление отклонения стрелки гальванометра от направления движения магнита и полярности вдвигаемого (выдвигаемого) полюса магнита.

Закрепите магнит в лапке штатива. Надевая катушку на магнит и снимая её, проведите эксперименты, подобные описанным в п. 1–3. На основании результатов экспериментов сформулируйте выводы и запишите их. В выводах отметьте, зависит ли (и если зависит, то как): а) величина отклонения стрелки гальванометра от скорости движения катушки; б) направление отклонения стрелки гальванометра от направления движения катушки и полярности полюса магнита, на который надевается (с которого снимается) катушка. Сопоставьте выводы из п. 4 и 5. Ответьте на вопрос: будет ли наблюдаться отличие в показаниях гальванометра в случаях, когда магнит вдвигают в неподвижную катушку и когда катушку надевают на неподвижный магнит с такой же по модулю скоростью?

Используя закон электромагнитной индукции, объясните зависимость величины отклонения стрелки гальванометра от скорости движения магнита в п. 1–3 и катушки в п. 5.

Используя правило Ленца, объясните зависимость направления отклонения стрелки гальванометра от направления движения магнита в п. 1–3 и катушки в п. 5 с учётом полярности полюсов магнита.

Вопросы

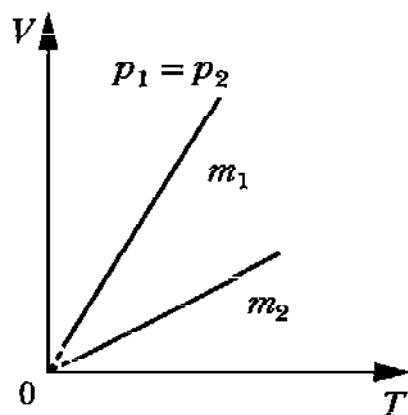
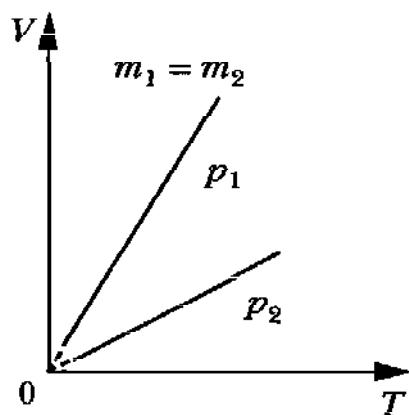
Когда в замкнутой электрической цепи возникает индукционный ток? Объясните результаты 1–3 опытов Фарадея (см. § 63), используя закон электромагнитной индукции и правило Ленца.

Ответы

- § 2.** 1. $\approx 0,8 \cdot 10^{-10}$ м. 2. $m_{N_2} \approx 46 \cdot 10^{-27}$ кг; $m_{O_2} \approx 53 \cdot 10^{-27}$ кг; $m_{Cu} \approx 106 \cdot 10^{-27}$ кг.
 3. $n_{O_2} \approx 6 \cdot 10^{24}$; $n_O = 2n_{O_2} \approx 1,2 \cdot 10^{25}$. 4. $n_{H_2}/n_{Cu} = 2,5$.
 5. $m_{Na} = 23$ а. е. м. $\approx 3,8 \cdot 10^{-26}$ кг. 6. 1 атом С и 2 атома О.
- § 3.** 1. 2 нм. 2. $\approx 8,5 \cdot 10^{22}$ шт; $\approx 0,23$ нм. 3. $\approx 0,32$ нм. 4. ≈ 168 нм.
 6. $\approx 25 \cdot 10^{12}$ с $\approx 7,9 \cdot 10^5$ лет.
- § 7.** 1. $6,64 \cdot 10^{-21}$ Дж. 2. 15 МДж.
- § 8.** 1. 0,6 Дж. 2. 0,3 МДж. 3. 6 Дж.
- § 9.** 400 Дж.
- § 13.** 2. 0,05 К. 4. 180 °F. 6. t °F $= 32 + 1,8 \cdot t$ °C.
- § 14.** 1. 252 кДж. 2. $\approx 4,65$ Дж; нет, термометр получит большее количество теплоты.
 3. ≈ 415 °C. 4. ≈ 727 кДж. 5. 0,9 кДж/(кг · K).
- § 15.** 1. $\approx 27,6$ МДж. 2. 15 К. 3. 200 л холодной и 150 л горячей воды.
- § 16.** 1. $\approx 0,25$ км. 2. 0,514 кг.
- § 19.** 2. 0,5 кг; 1,2 кг; 6 кг. 3. $7,5$ г/м³. 4. ≈ 415 г.
- § 20.** 1. 9 кДж. 2. 3,45 МДж. 3. 10,5 МДж. 4. 2,64 МДж.
- § 21.** 1. Вода. 2. AB — нагревание льда; BC — плавление льда; CD — нагревание воды; DE — кипячение воды; EF — нагревание пара. 3. AB, CD, EF — кинетическая энергия росла; BC, DE — оставалась неизменной.
 4. В точке N . 5. В точке E .
 6. $Q_{AB} = 168$ кДж; $Q_{BC} = 680$ кДж; $Q_{CD} = 840$ кДж; $Q_{DE} = 4,6$ МДж.
 7. 6,12 МДж.
 8. $N_{AB} = 84$ кДж/мин; $N_{BC} = 340$ кДж/мин; $N_{CD} = 560$ кДж/мин;
 $N_{DE} = 2,3$ МДж/мин.
- § 22.** 1. Уменьшится в два раза. 2. 12 кПа. 3. $\approx 0,4$ м³. 4. $p/\rho = \text{const}$.
- § 23.** 1. Уменьшится в два раза. 2. Увеличится в три раза. 3. 125 кПа. 4. 200 К.
- § 24.** 1. Уменьшится в два раза. 2. Увеличится в три раза. 3. ≈ 6 л.

*4.

5.



§ 25. 1. В 12 раз. 2. 136,5 К. 3. 0,15 кПа.

§ 26. а) $\Delta U = Q$. б) $\Delta U = -Q$. в) $\Delta U = -p\Delta V + Q$. г) $\Delta U = p\Delta V - Q$.

§ 29. 1. $\approx 0,616$. 2. $\approx 0,20$. 3. ≈ 56 кВт; $\approx 2,8$ кН. 4. $2,74 \cdot 10^{14}$ Дж. 5. $\approx 45\%$.

§ 30. 1. а) Увеличится; б) увеличится, но меньше, чем в случае а. 2. 212 кДж.
3. 100 Дж. 4. 400 Дж.

§ 34. 3. 12 протонов. 4. 8 электронов.

§ 37. 1. Уменьшится в четыре раза; увеличится в четыре раза. 2. Уменьшится в девять раз. 3. $6 \cdot 10^{-9}$ Кл; $11 \cdot 10^{-12}$ Кл; $56 \cdot 10^{-6}$ Кл. 4. $1,6 \cdot 10^{-10}$ нКл. 5. 30 мкН. 6. ≈ 10 м. 7. ≈ 14 МКл. 8. $9,3 \cdot 10^{18}$ Н.

§ 38. 1. 0. 2. 0,12 Н; в сторону отрицательного заряда по прямой, на которой расположены заряды. 4. а), б) не изменится. 5. 0,4 Н; по прямой, на которой расположены заряды, в сторону заряда q_4 .

§ 39. 2. 0,2 кН/Кл. 3. 0,1 МН/Кл. 4. ≈ 92 нН.

§ 40. 3. 0.

§ 41. 1. Увеличится в пять раз. 2. Уменьшится в два раза. 3. Изменит знак на противоположный. 4. 3,3 мкДж. 5. 2,5 мкДж. 6. 12,5 нДж; 0,5 В.

§ 42. 1. 1 МВ/м. 2. 10 мДж. 3. 5 мДж. 4. 2 мкКл; 10 кВ. 5. 2 Н.

§ 45. 1. $5 \cdot 10^3$ А; 0,1 А; $30 \cdot 10^{-6}$ А. 2. 1,8 кКл. 3. $7,5 \cdot 10^{21}$. 4. 300 А.

§ 46. 1. 0,5 А. 2. а) Нет, так как он позволяет измерять напряжения ≤ 30 В; б) нет, так как ошибка измерения будет большой. 3. 0,2 А.

§ 47. 1. 3,2 А. 2. 6,25 Ом. 3. 2 В. 4. 0,2 А. 5. $R_B > R_A$.

§ 48. 2. $16 \cdot 10^{-9}$ Ом · м. 3. а) 70 мОм; б) 0,525 Ом; в) 2,75 Ом; г) 42,5 мОм.
4. Уменьшится в шесть раз. 5. Увеличивается.

§ 49. 1. 2 мА. 2. 110 В. 3. 0,225 Ом; 0,34 мВ; 0,56 мВ.

4. Если длину медного провода уменьшить в два раза — 0,1825 Ом; 0,2096 мВ; 0,6904 мВ. Если поперечное сечение алюминиевого провода уменьшить в 2 раза — 0,365 Ом; 0,3285 мВ; 0,5715 мВ.

§ 50. 1. а) 150 В, 150 В; б) 3 А, 5 А; в) 8 А; г) 18,75 Ом. 2. 0,5 А. 3. $r_{\text{пар}} / r_{\text{посл}} = 0,24$. 4. 34,7 А; 8,3 А.

§ 51. 1. $\approx 0,27$ А. 2. 5,7 МДж. 3. 760 Вт. 4. 1,2 кА. 5. $\approx 23,7$ ГДж. 6. В 6,25 раза.

§ 52. 1. Железная. 2. 0,5 А. 3. 20 Ом. 4. 36 кДж.

§ 58. 4. Нет.

§ 60. 1. ≈ 1 мОм. 2. ≈ 100 кОм.

§ 62. 1. Северный полюс полосы будет обращён на север, южный — на юг.
2. Нет. Наибольшей разности показаний будет вблизи магнитных полюсов Земли.

§ 63. 2. а) Влево; б) влево; в) не будет отклоняться; г) вправо.

Алфавитно-предметный указатель

- Агрегатное состояние 82
Аккумулятор 255
Амперметр 216
Атом 6, 158
Атомная единица массы 10
- Вектор
 индукции магнитного поля 276
 напряжённости
 электрического поля 181
- Вещество
 аморфное 29
 кристаллическое 28
 простое 6
 сложное 6
- Взаимодействие
 магнитное 261
 электрическое 154
- Влажность
 абсолютная 90
 относительная 90
- Вольтметр 217
- Газ идеальный 109
Гальванометр 278
Гигрометр 91
- Двигатель
 внутреннего сгорания 131
 паровой 132
 реактивный 135
 турбореактивный 135
- Движение
 бронновское 16
 тепловое (хаотическое) 34
- Диффузия 17
- Дизлектрик 161
- Ёмкость
 аккумулятора 255
 конденсатора 197
- Заземление 168
- Закон
 Ампера 273
- Бойля – Мариотта 108
Гей-Люссака 116
Кулона 170
нулевой термодинамики 58
объединённый газовый 120
Ома 220
первый термодинамики 47
сохранения электрического
заряда 162
сохранения энергии
в тепловых процессах 45
Шарля 112
электромагнитной
индукции 288
- Заряд
 пробный 179
 точечный 170
 электрический 155
- Излучение 52
Изолятор 161
Изотоп 159
Ион 160
Испарение 82
- Кипение 94
Количество теплоты 42
Коллектор 278
Конвекция 51
Конденсатор 144, 195
Конденсация 85
Кристаллизация 99
Кристаллическая решётка 28
- Линия
 магнитная 267
 напряжённости
 электрического поля 184
- Магнит
 постоянный 259
- Магнитная
 ось 260
 стрелка 260

Макропараметр 107
Напряжение 189
Напряжённость 179
Нейtron 158
Пар
насыщенный 88
ненасыщенный 87
Плавление 99
Поле
магнитное 262
электрическое 179
электромагнитное 289
Полюс
источника тока 206
магнита 260
магнитный Земли 283
Постоянная Авогадро 11
Правило
буравчика 269
знаков в термодинамике 39
левой руки 275
Ленца 288
Протон 158
Процесс
изобарный 116
изотермический 108
изохорный 112
равновесный 107
Психрометр 91
Резистор 223
Реостат 227
Сила
Ампера 274
магнитная 261
сторонняя 205
тока 211
электрическая 154

Сопротивление
проводника 220
удельное 225
Суперпозиции принцип 176
Температура 56
Тепловое равновесие 57
Теплоёмкость 64
Теплообмен 42
Теплопроводность 49
Термодинамическая система
изолированная 57
полностью изолированная 58
теплоизолированная 57
Ток
Ампера (молекулярный) 271
индукционный 287
электрический 203
Точка росы 91
Удельная теплота
парообразования 93
плавления 102
сгорания топлива 75
Холодильник 144
Электризация 153
Электродвигатель 278
Электромагнит 280
Электрон 158
Энергия
внутренняя 32
заряженного конденсатора 195
Явление
магнитной индукции 259
электрические 153
электромагнитной
индукции 287

Оглавление

Глава 1. Молекулярная теория строения вещества	5
§ 1. Вещество и его структурные единицы	5
§ 2. Свойства вещества. Модель молекулы	7
§ 3. Примеры решения задач	13
§ 4. Движение молекул	15
§ 5. Взаимодействие молекул	20
§ 6. Агрегатные состояния вещества	27
Глава 2. Основы термодинамики	32
· § 7. Внутренняя энергия термодинамической системы	32
· § 8. Изменение внутренней энергии термодинамической системы в результате совершения работы	36
§ 9. Изменение внутренней энергии термодинамической системы в результате теплообмена	42
§ 10. Изменение внутренней энергии в общем случае. Закон сохранения энергии при тепловых процессах	45
§ 11. Виды теплообмена	49
§ 12. Температура и тепловое равновесие	56
§ 13. Измерение температуры. Термометр	59
§ 14. Теплоёмкость тела. Удельная теплоёмкость	64
§ 15. Расчёт количества теплоты при теплообмене. Примеры решения задач	69
§ 16. Удельная теплота сгорания топлива	75
Глава 3. Изменения агрегатных состояний вещества	82
§ 17. Испарение и конденсация	82
§ 18. Скорость процесса испарения. Насыщенный пар	86
§ 19. Влажность воздуха	90
§ 20. Удельная теплота парообразования. Кипение	94
§ 21. Плавление и кристаллизация. Удельная теплота плавления	99
Глава 4. Газовые законы	107
§ 22. Закон Бойля – Мариотта. Изотермический процесс	108
§ 23. Изохорный процесс. Закон Шарля	112
§ 24. Изобарный процесс. Закон Гей-Люссака	116
§ 25. Объединённый газовый закон	120
§ 26. Применение первого закона термодинамики к изобарному и изохорному процессам	123

Глава 5. Тепловые машины	130
§ 27. Поршневые двигатели внутреннего сгорания	131
§ 28. Паровые и газовые турбины. Турбореактивные двигатели и реактивные двигатели ракет	135
§ 29. Коэффициент полезного действия тепловых двигателей	140
§ 30. Холодильные машины	144
§ 31. Экологические проблемы использования тепловых машин	147
§ 32. Применение законов термодинамики для описания работы теплового двигателя	148
Глава 6. Электрические явления	153
§ 33. Электризация тел. Два вида электрических зарядов	153
§ 34. Строение атомов	158
§ 35. Объяснение электрических явлений. Закон сохранения электрического заряда	162
§ 36. Электроскоп	167
§ 37. Закон Кулона	170
§ 38. Сложение электрических сил	175
§ 39. Электрическое поле. Напряжённость – силовая характеристика электрического поля	179
§ 40. Силовые линии электрического поля. Однородное электрическое поле	184
§ 41. Работа сил электрического поля. Напряжение	189
§ 42. Конденсаторы. Энергия электрического поля конденсатора	195
Глава 7. Постоянный электрический ток	203
§ 43. Электрический ток. Условия его возникновения. Электрическая цепь	203
§ 44. Электрический ток в металлах	208
§ 45. Направление электрического тока. Сила тока	211
§ 46. Измерение силы тока и напряжения	216
§ 47. Зависимость силы тока от напряжения. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление проводника	220
§ 48. Расчёт сопротивления проводника. Удельное сопротивление вещества	225
§ 49. Последовательное соединение проводников	230
§ 50. Параллельное соединение проводников	234

§ 51. Работа и мощность электрического тока	237
§ 52. Закон Джоуля – Ленца. Электрические нагревательные приборы	241
§ 53. Носители электрических зарядов в газах	246
§ 54. Носители электрических зарядов в полупроводниках	248
§ 55. Источники тока	252
Глава 8. Электромагнитные явления	259
§ 56. Магниты и их свойства	259
§ 57. Магнитное поле. Единица силы тока	262
§ 58. Магнитное поле. Линии магнитной индукции	267
§ 59. Действие магнитного поля на проводники с токами. Сила Ампера	273
§ 60. Электродвигатели. Гальванометр	278
§ 61. Электромагниты и их применение	281
§ 62. Магнитное поле Земли	283
§ 63. Опыты Фарадея. Электромагнитная индукция	286
Лабораторные работы	292
Ответы	314
Алфавитно-предметный указатель	316

