

О. Ф. КАБАРДИН,
С. И. КАБАРИНА,
Н. И. ШЕФЕР

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ

9 КЛАСС

Пособие для учащихся

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1978

530.3(075)
К12

*Рекомендовано к изданию
Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР*

- Кабардин О. Ф. и др.**
К12 Факультативный курс физики. 9 кл. Пособие для учащихся. Изд. 2-е, перераб. М., «Просвещение», 1978. 207 с. с ил., 10 л. ил.

Перед загл. авт.: О. Ф. Кабардин, С. И. Кабардина, Н. И. Шефер. Книга состоит из 5 глав: «Строение и превращения вещества», «Термодинамика», «Электрическое поле и электрический ток», «Магнетизм», «Физический практикум». В них содержится теоретический материал в соответствии с программой факультативного курса физики 9 класса, задачи с примерами их решения и описания лабораторных работ.

К $\frac{606\ 01-242}{103(03)-78}$ инф. письмо 530.3(075) + 537(075)

© Издательство «Просвещение», 1978 г., с изменениями.

СТРОЕНИЕ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

§ 1. АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ

Возникновение атомной теории строения вещества. Создателями учения об атомном строении вещества считаются древние греческие философы Левкипп и его ученик Демокрит, жившие в V в. до н. э.

Вот примеры некоторых высказываний Демокрита об атомах:

«Ничего не существует, кроме атомов и пустого пространства; все прочее — мнение».

«Атомы бесконечны в числе и бесконечно различны по форме...»

«Различие всех предметов зависит от различия их атомов в числе, величине, форме и порядке; качественного различия атомов не существует».

Позднее учение Демокрита поддерживалось Эпикуром, чьи философские взгляды были изложены в начале I в. до н. э. римским поэтом Титом Лукрецием Каром в знаменитой поэме «О природе вещей». Вот как излагал сущность взглядов древнегреческих ученых-атомистов Лукреций в своей поэме:

270 «Выслушай то, что скажу, и ты сам, несомненно, признаешь,
Что существуют тела, которых мы видеть не можем.
Ветер, во-первых, морей неистово волны бичует,
Рушит громады судов и небесные тучи разносит...
Стало быть, ветры — тела, но только незримые нами.

.....
Далее, запахи мы обоняем различного рода,



Демокрит

299 Хотя и не видим совсем, как в ноздри они проникают.

И, наконец, на морском берегу, разбивающем волны,
Платье сыреет всегда, а на солнце вися, оно сохнет;
Видеть, однако, нельзя, как влага на нем оседает,
Да и не видно того, как она исчезает от зноя.
Значит, дробится вода на такие мельчайшие части,
Что недоступны они совершенно для нашего глаза.

«...Так как есть предельная некая точка

600 Тела того, что уже недоступно для нашего чувства,
То, несомненно, она совсем неделима на части,
Будучи меньше всего по природе своей...»

У древнегреческих философов-атомистов и их последователей не было никаких сомнений в том, что атомы различных веществ отличаются друг от друга по форме. Вот что писал по этому поводу Лукреций Кар в той же поэме:

«Так что опять повторяю, что должны точно так же иные
Первоначала вещей, — раз они порождены природы,
А не при помощи рук на один образец создавались, —

380 В формах различных летать и несхожими быть по фигурам.

И хоть мгновенно вино, когда цедишь его, протекает,
Но потихоньку идет и сочится ленивое масло;
Иль потому, что его, очевидно, крупней элементы,
Иль крючковатей они и спутаны больше друг с другом;
Надо добавить еще, что и мед и молочная влага
На языке и во рту ощущаются нами приятно;

400 Наоборот же, полынь своей горечью или же дикий
Тысячелистник уста нам кривят отвратительным вкусом.
Так что легко заключить, что из гладких и круглых частичек
То состоит, что давать ощущение приятное может;
Наоборот, то, что вам представляется горьким и терпким,
Из крючковатых частиц образуется, тесно сплетенных,
А потому и пути к нашим чувствам оно раздирает,
Проникновением своим нанося поранения телу.»

Чтение строк поэмы, в которых дается объяснение зависимости вкусовых свойств различных веществ от формы составляющих их атомов, гладких и вкусных или крючковатых и горьких, у современного читателя вызывает невольную улыбку.

Но вот как, например, излагается существо одной из современных теорий восприятия запаха в научно-популярном журнале: «Стереохимическая теория запаха предполагает, что химически активная молекула действует на обонятельный эпителий только в том случае, если она обладает определенной формой и величиной. Более того, характер запаха связан с размерами и формой молекул. Так, общей особенностью веществ, обладающих камфарным запахом, является шарообразная форма их молекул с диаметром $7 \cdot 10^{-8}$ см. Для более 100 веществ, обладающих камфарным запахом, характерны именно такая форма и величина молекул.

Подобно тому как восприятие всех вкусовых ощущений сводится к комбинации четырех основных: соленого, сладкого, горького и

кислого, так и все запахи можно разделить на семь основных категорий. Это запах эфира, камфары, мускуса, цветочный запах, запах мяты, удушливый и гнилостный запахи... Предполагается, что для восприятия молекулы каждого типа в клетках обонятельного эпителия существуют углубления соответственной величины и формы...» Формы молекул и ячеек в рецепторных клетках для семи основных запахов показаны на рисунке 1.

§ 2. ЧИСЛО АВОГАДРО

Представления об атомах и молекулах как о мельчайших частицах вещества оставались лишь правдоподобной гипотезой до тех пор, пока не были разработаны методы обнаружения отдельных атомов и молекул, измерения их масс и размеров.

Одним из первых приборов, с помощью которого удалось обнаруживать отдельные атомы, был спинтарископ. В этом приборе при наблюдении через лупу удается заметить световую вспышку, возникающую при столкновении одного быстро летящего атома с кристаллом сернистого цинка. Используя для счета отдельных атомов спинтарископ, Резерфорд и Ройдс выполнили эксперимент, по результатам которого можно было определить число Авогадро.

В 1909 г. они доказали, что альфа-частицы, испускаемые при радиоактивном распаде ядер радия, являются атомами гелия без электронных оболочек. При вылете из ядра альфа-частица обладает большой кинетической энергией. Световая вспышка, возникающая при попадании альфа-частицы в кристалл сернистого цинка, оказывается настолько интенсивной, что ее можно заметить глазом через обычную лупу с 10-кратным увеличением. Подсчитывая число световых вспышек, можно было определить число альфа-частиц, испускаемых 1 г радия за 1 с. Разумеется, при этом вовсе не обязательно использовать именно 1 г радия. Измерения обычно производят со значительно меньшим его количеством, а данные, относящиеся к 1 г радия, получают вычислением.

Далее Резерфорд и Ройдс поместили некоторое количество радия в герметичный сосуд и создали в этом сосуде вакуум, т. е. откачали с помощью насоса находящиеся в нем газы. Испускаемые радием альфа-частицы при соударении со стенками сосуда присоединяют к себе по два электрона и превращаются в атомы гелия, которые с течением времени накапливаются в сосуде. Измерив объем V , занимаемый гелием в сосуде при нормальных условиях, зная число альфа-частиц N , испускаемых за время накопления, и объем 1 моль любого газа при нормальных условиях $V_M = 22,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3$, можно определить число Авогадро N_A . Для этого достаточно на основании закона Авогадро составить уравнение и решить его:

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_M}; \quad N_A = \frac{NV_M}{V}.$$

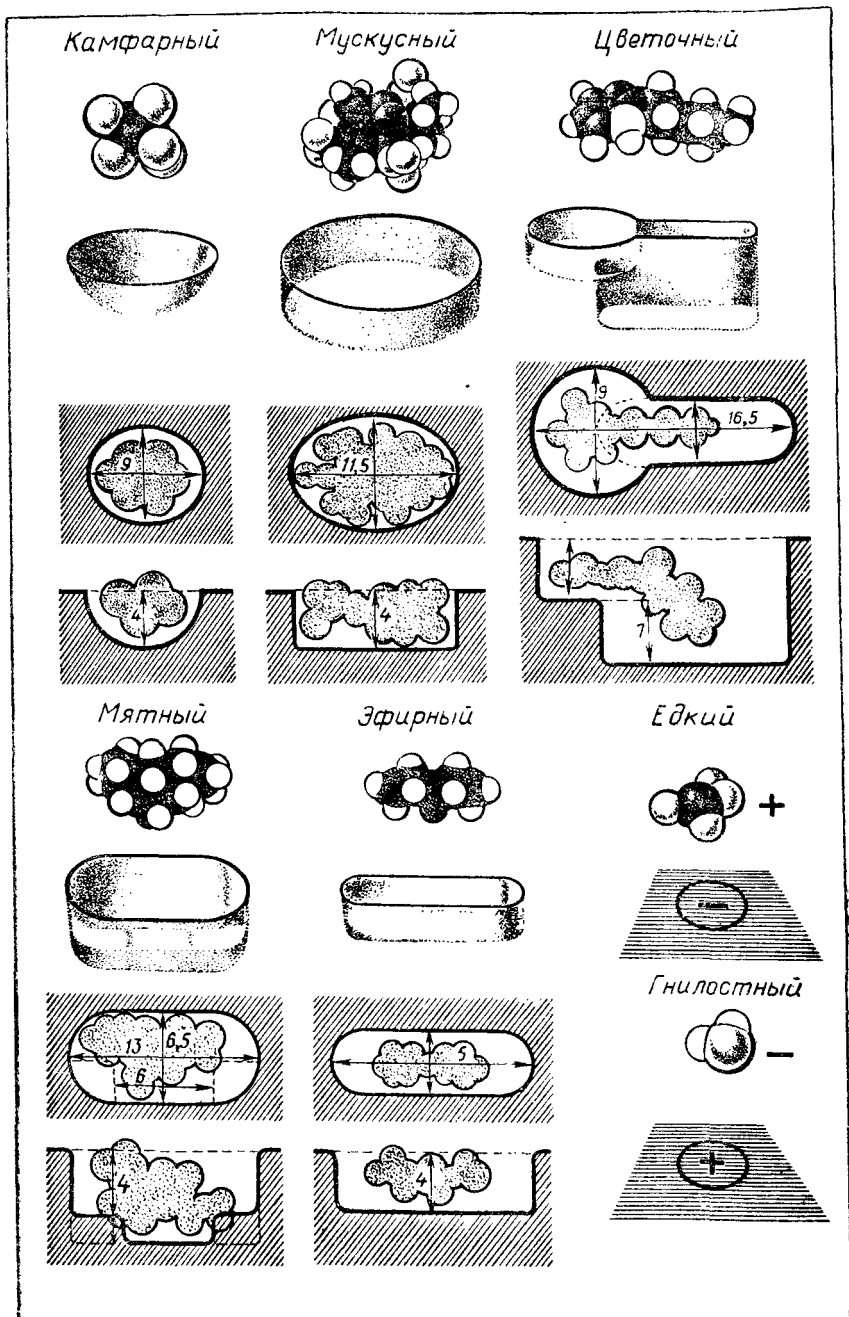


Рис. 1. Формы молекул и ячеек в рецепторных клетках для семи основных запахов

Этим простым, но не очень точным способом было получено число, примерно на 10% отличающееся от истинного значения числа Авогадро, определенного в настоящее время с большой степенью точности другими способами: $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Зная число Авогадро, легко определить массы отдельных атомов и молекул. Для этого достаточно известную молярную массу вещества M разделить на число Авогадро:

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

Форма и размеры крупных молекул в настоящее время могут определяться экспериментально с помощью электронного микроскопа. В этом микроскопе увеличенное в несколько сотен тысяч раз изображение исследуемого объекта получается примерно так же, как проецируется на экран изображение пленки в диапроекторе, только вместо пучка света в нем используется поток быстрых электронов.

§ 3. ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ

Метод моделей. Учение о строении и свойствах вещества, развитое в XIX в. на основе представлений о существовании молекул, взаимодействующих между собой по законам механики, получило название молекулярно-кинетической теории.

В молекулярно-кинетической теории широко используется метод моделей. Метод моделей заключается в том, что вместо реального физического объекта или явления теория рассматривает его упрощенную мысленную модель. Основные механические и тепловые свойства вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях можно качественно объяснить, если предположить, что вещество состоит из молекул, между которыми существуют силы взаимного притяжения, действующие на малых расстояниях, а при столкновениях действуют силы отталкивания.

Особенности взаимодействия тел, между которыми одновременно действуют силы притяжения и отталкивания, можно наблюдать в опытах с двумя резиновыми мячами, смазанными тонким слоем резинового клея. При небольшой скорости относительного движения силы сцепления превосходят силы упругого отталкивания, мячи при столкновении слипаются (рис. 2, а). При большой скорости относительного движения силы отталкивания при ударе превосходят силы сцепления и мячи разлетаются после удара (рис. 2, б).

Подобно упругим и вместе с тем способным к соединению мячам, молекулы вещества при

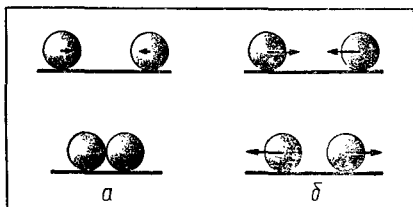


Рис. 2. Столкновение мячей

малых скоростях относительного движения (при низких температурах) соединяются силами молекулярного притяжения, образуют твердое тело или жидкость. Молекулы в твердом теле находятся друг от друга на таких расстояниях, на которых силы их взаимного притяжения оказываются в точности равны силам отталкивания. При высоких температурах скорости движения молекул велики, и, хотя силы взаимного притяжения между ними по-прежнему существуют, силы отталкивания при каждом столкновении оказываются преобладающими, и молекулы не соединяются в твердое тело или жидкость. Вещество, состоящее из свободно движущихся молекул, взаимодействующих между собой только при столкновениях, находится в газообразном состоянии.

О том, что вещество в газообразном состоянии состоит из свободных молекул, хаотически движущихся с большими скоростями, свидетельствуют факты существования давления газа на стенки сосуда, диффузии и способности газа к неограниченному расширению. Наибольших успехов молекулярно-кинетическая теория достигла в объяснении свойств вещества в газообразном состоянии.

Идеальный газ. *Идеальный газ — это такой газ, молекулы которого обладают пренебрежимо малым объемом по сравнению с объемом сосуда. В идеальном газе между соударениями молекулы не взаимодействуют, в моменты соударений они взаимодействуют между собой и со стенками сосуда как упругие тела.*

Параметры газа, связанные с индивидуальными характеристиками составляющих его молекул, называются микроскопическими. К их числу относятся в первую очередь масса молекул, их скорость и кинетическая энергия поступательного движения.

Параметры газа как физического тела, изучаемого обычными методами, называются макроскопическими параметрами. К ним в первую очередь относятся объем и давление газа. Одной из важнейших задач молекулярно-кинетической теории было установление связи между макроскопическими и микроскопическими параметрами газа.

§ 4. ДАВЛЕНИЕ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Используя модель идеального газа, вычислим давление газа на стенку сосуда. Пусть в сферическом сосуде радиусом R находится N молекул идеального газа массой m каждая. Согласно представлениям молекулярно-кинетической теории молекулы газа имеют различные скорости движения, движутся хаотически и испытывают упругие соударения между собой и со стенкой сосуда. Если не рассматривать взаимные соударения молекул, то, как следует из геометрических соображений, в результате упругих соударений со стенкой сферы траектория движения одной молекулы в таком сосуде должна быть ломаной линией $ABCDE\dots$, лежать в плоскости, проходящей через центр сферы, и состоять из отрезков равной длины (рис. 3).

При каждом столкновении со стенкой нормальная (перпендикулярная стенке сосуда) составляющая импульса молекулы изменяется по направлению на 180° , оставаясь неизменной по модулю. Тангенциальная (касательная к поверхности сосуда) составляющая импульса остается неизменной, следовательно, изменение импульса молекулы, движущейся со скоростью v , после одного столкновения со стенкой сосуда равно по модулю:

$$mv \cos \varphi - (-mv \cos \varphi) = 2mv \cos \varphi. \quad (1.1)$$

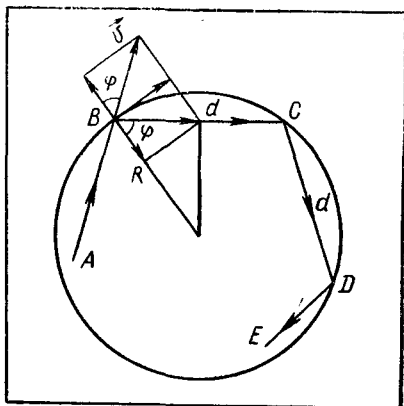


Рис. 3. Траектория движения молекулы в сферическом сосуде

Подсчитаем сумму модулей изменения импульса одной молекулы при ударах о стенку сосуда за интервал времени Δt . Для этого умножим изменение импульса молекулы при одном столкновении на число ее столкновений ν со стенкой сосуда за интервал времени Δt . Число столкновений молекулы со стенкой сосуда найдем, разделив путь, пройденный молекулой за время Δt , на длину пути между столкновениями d :

$$\nu = \frac{v \cdot \Delta t}{d} = \frac{v \cdot \Delta t}{2R \cos \varphi}. \quad (1.2)$$

Отсюда сумма модулей изменений импульса молекулы или сумма модулей импульса, передаваемого молекулой стенке сосуда за время Δt , равна:

$$\Delta(mv) = 2mv \cos \varphi \cdot \nu = 2mv \cos \varphi \frac{v \cdot \Delta t}{2R \cos \varphi} = \frac{mv^2}{R} \Delta t. \quad (1.3)$$

Поскольку

$$\Delta(mv) = F \cdot \Delta t,$$

то

$$F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = \frac{\nu mv^2}{R}. \quad (1.4)$$

Заменяя $F = pS$, получим:

$$p = \frac{mv^2}{RS}, \quad (1.5)$$

где R — радиус сферы, S — площадь ее поверхности. Используя далее $S = 4\pi R^2$, получим:

$$p = \frac{mv^2}{4\pi R^3}. \quad (1.6)$$

Удары о стенку сосуда N молекул, заключенных в нем и движущихся с различными скоростями \vec{v}_1, \vec{v}_2 и т. д., приводят к возникновению давления:

$$p = \frac{mv_1^2 + mv_2^2 + \dots + mv_N^2}{4\pi R^2} = \frac{m(v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2)}{4\pi R^2}. \quad (1.7)$$

Введя обозначение для среднего значения квадрата скорости молекулы

$$\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N} = \bar{v}^2 \quad (1.8)$$

и учитывая, что объем шара радиусом R равен:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3,$$

получим:

$$p = \frac{\frac{1}{3} mN\bar{v}^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{\frac{1}{3} mN\bar{v}^2}{V} = \frac{1}{3} m n \bar{v}^2. \quad (1.9)$$

Мы получили, что давление газа p пропорционально массе одной молекулы m , концентрации молекул n и среднему квадрату скорости поступательного движения \bar{v}^2 при их хаотическом тепловом движении.

Вывод получен для сосуда сферической формы и без учета столкновений молекул между собой. Более строгие вычисления дают точно такой же результат для сосуда произвольной формы и с учетом взаимных соударений молекул.

Используя выражение, определяющее кинетическую энергию E поступательно движущегося со скоростью v тела массой m

$$E = \frac{mv^2}{2},$$

установим связь между средним значением кинетической энергии поступательного движения молекул E и давлением газа [на стенки сосуда p :

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}. \quad (1.10)$$

§ 5. ГАЗОВЫЙ ТЕРМОМЕТР

Температура. Не менее важной задачей для молекулярно-кинетической теории является установление связи температуры тела с его микроскопическими параметрами.

Температура характеризует степень нагретости тела. О различной нагретости тел судят по процессу теплопередачи, происходящему при тепловом контакте тел. Если при осуществлении теп-

лового контакта между телами *A* и *B* происходит теплопередача от тела *A* к телу *B*, то температура тела *A* выше температуры тела *B*. Если теплопередача между телами *A* и *B* не происходит, тела *A* и *B* находятся в тепловом равновесии, их температура одинакова.

Для количественного выражения степени нагретости тел в практике широко используется свойство расширения тел при нагревании. В жидкостном термометре расширение жидкости, заключенной в стеклянный сосуд с тонкой трубкой, измеряется по шкале, прикрепленной к тонкой стеклянной трубке с жидкостью. При измерении температуры по шкале Цельсия за нулевую точку отсчета принята температура таяющего льда при нормальном давлении — 0°C , за 100°C — температура кипящей воды при том же давлении. Шкала термометра между положениями, занимаемыми поверхностью жидкости в трубке термометра при 0°C и при 100°C , делится на сто равных частей. *Изменение температуры, при котором уровень жидкости в термометре перемещается на одно деление, называется градусом по Цельсию.*

Для измерения температуры тела жидкостный термометр приводят в тепловой контакт с этим телом и после установления теплового равновесия между жидкостью в термометре и телом производят отсчет температуры по шкале термометра. Установление теплового равновесия между термометром и телом определяется по прекращению процесса расширения жидкости в термометре.

При использовании для измерения температуры тел жидкостных термометров понятие температуры оказывается связанным с конкретными физическими свойствами определенного вещества, используемого в качестве рабочего тела в термометре, — ртути, глицерина, спирта. При этом нет никакой гарантии, что обнаруживаемые на опыте зависимости каких-либо физических величин от температуры имеют глубокий физический смысл. Более того, тщательно изготовленный одним способом ртутный и глицериновый термометры при одинаковых показаниях при 0° и 100°C дают различные показания при других температурах! При 50°C по ртутному термометру глицериновый показывает $47,6^{\circ}\text{C}$!

Связь с индивидуальными свойствами одного вещества, применяемого для изготовления термометров, значительно обедняет физический смысл понятия температуры тела. Первый существенный шаг к формированию современного понятия температуры, не связанного с индивидуальными свойствами какого-то определенного вещества, был сделан молекулярно-кинетической теорией газов.

Газовый термометр. Свойство газов, обнаруженное экспериментально в конце XVIII в. французским физиком Шарлем, дает способ измерения температуры, не связанный со свойствами одного конкретного вещества. Шарль установил, что при нагревании на 1°C при постоянном объеме давление любого газа повышается на одну и ту же величину. По современным измерениям при нагревании на 1°C давление газа повышается примерно на $1/273$ давления

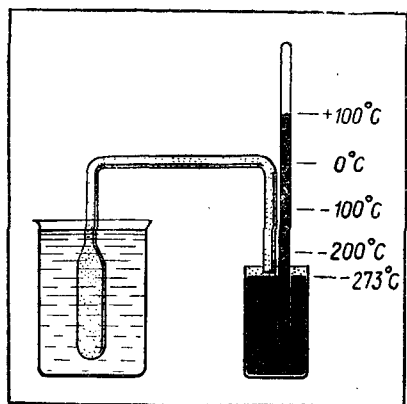


Рис. 4. Газовый термометр

при температуре 0°C . Таким образом, зависимость давления любого газа от температуры при постоянном объеме выражается законом:

$$p = p_0 (1 + \alpha t),$$

где p_0 — давление газа при 0°C , p — давление газа при температуре $t^\circ\text{C}$, $\alpha = 1/273^\circ\text{C}^{-1}$ — термический коэффициент давления.

Зависимость давления газа от температуры позволяет изготовить газовый термометр и определить с его помощью новую шкалу температур.

Соединив сосуд, в котором находится газ, с манометром, можно измерять температуру по показаниям манометра (рис. 4). При этом обращает на себя внимание замечательный факт: при температуре $t = -273^\circ\text{C}$ давление газа должно стать равным нулю! Естественно выбрать эту температуру за точку отсчета новой температурной шкалы, оставив в качестве второй точки отсчета температуру таяния льда при нормальных условиях.

В международной системе единиц СИ для измерения температуры, обозначаемой буквой T , выбрана одна реперная (постоянная) точка — тройная точка воды. *Тройной точкой воды называется температура, при которой находятся в динамическом равновесии лед, вода и водяной пар, заключенные в одном сосуде, т. е. не происходит изменения количества льда, воды и водяного пара в результате процессов плавления и отвердевания, испарения и конденсации.* Единицей измерения температуры в СИ служит кельвин. Температура тройной точки воды принята за $273,16\text{ K}$. Кельвин — $1/273,16$ температуры тройной точки воды. Единицы измерения разности температур — градус Цельсия ($^\circ\text{C}$) и кельвин (K) — совпадают.

Тройная точка воды выбрана в качестве реперной точки потому, что ее удается воспроизводить экспериментальным путем с погрешностью не более $0,0001\text{ K}$. Температура тройной точки воды выше точки таяния льда при нормальном давлении на $0,01\text{ K}$. Поэтому связь между температурой t по шкале Цельсия в градусах Цельсия и температурой T в кельвинах, называемой иногда абсолютной температурой, устанавливается выражением

$$t = T - T_0,$$

где $T_0 = 273,15\text{ K}$.

Переходя от измерений температуры по шкале Цельсия к измерениям температуры по абсолютной шкале, экспериментально уста-

новленную зависимость давления любого газа от температуры можно выразить следующим образом (рис. 5):

$$p = p_0 [1 + \alpha (T - T_0)] = p_0 (1 + \alpha T - \alpha T_0) = p_0 \alpha T.$$

Уточненное значение термического коэффициента давления газа в этом выражении равно $1/273,15 \text{ K}^{-1}$.

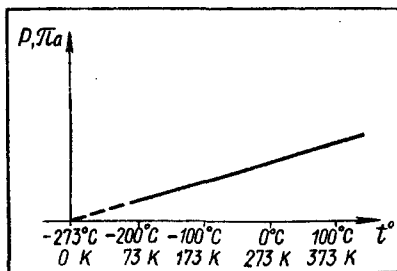


Рис. 5. Зависимость давления газа от температуры

§ 6. ТЕМПЕРАТУРА КАК МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Таким образом, мы имеем два выражения, определяющие давление газа при постоянном объеме:

$$p = p_0 \alpha T, \quad (1.13)$$

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}. \quad (1.10)$$

Первое из них является определением понятия температуры, второе выведено теоретически в молекулярно-кинетической теории идеального газа.

Из этих выражений следует:

$$\bar{E} = \frac{3p}{2n} = \frac{3p_0 \alpha T}{2n}. \quad (1.14)$$

Отношение $\frac{p_0}{n}$ является постоянной величиной.

Обозначив $\frac{p_0 \alpha}{n} = k,$ (1.15)

получаем: $\bar{E} = \frac{3}{2} kT,$ (1.16)

где постоянная k называется постоянной Больцмана.

Мы получили, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа пропорциональна первой степени абсолютной температуры газа.

Таким образом, молекулярно-кинетическая теория дает четкое определение понятия температуры газа как меры средней кинетической энергии хаотического поступательного движения его молекул. Следовательно, температуру можно измерять в единицах энергии — в джоулях.

Для установления связи между единицей измерения температуры «кельвин» и единицей энергии «джоуль» необходимо вычислить

постоянную Больцмана k . Для вычисления можно воспользоваться любым значением p_0 и соответствующим ему значением n .

Используем известные сведения о газе при нормальных условиях:

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}, \quad \alpha = \frac{1}{273,16} \text{ К}^{-1}, \quad n = \frac{N_A}{V_0} = \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3},$$

$$k = \frac{p_0 \alpha}{n}; \quad k = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 273,16 \text{ К}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}.$$

При температуре в 1 К средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа равна:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 1 \text{ К} \approx 2 \cdot 10^{-23} \text{ Дж}.$$

Зависимость давления идеального газа от температуры можно выразить как:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{3} n \cdot \frac{3}{2} kT = nkT. \quad (1.17)$$

§ 7. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Используя установленную зависимость давления p идеального газа от температуры T и концентрации молекул n (1.17), можно найти связь между основными макроскопическими параметрами газа — объемом газа V , давлением p , температурой T при заданных значениях массы газа m и молярной массы M . Для этого найдем концентрацию n молекул газа:

$$n = \frac{N}{V}, \quad N = \frac{m}{M} N_A, \quad n = \frac{m N_A}{VM}.$$

Отсюда

$$p = nkT = \frac{m N_A}{VM} kT.$$

Обозначив $N_A k = R$, получим выражение, называемое уравнением состояния идеального газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (1.18)$$

Постоянная R в этом выражении называется молярной газовой постоянной. Ее значение равно:

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

Уравнение состояния газа было получено впервые французским физиком Клапейроном на основе обобщения результатов экспериментальных исследований свойств газов. В форме (1.18) его первым применил Д. И. Менделеев, поэтому уравнение состояния газа называется также уравнением Клапейрона — Менделеева.

§ 8. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Уравнение Клапейрона — Менделеева было получено на основе обобщения экспериментальных данных о свойствах реальных газов раньше, чем была создана молекулярно-кинетическая теория и получено уравнение состояния идеального газа. Совпадение уравнения Клапейрона—Менделеева с полученным теоретически уравнением состояния идеального газа свидетельствовало о больших возможностях применения молекулярно-кинетической теории в практике. Однако экспериментальные исследования свойств газов при высоких давлениях и низких температурах, выполненные еще в конце прошлого века, убедительно показали, что уравнение состояния идеального газа дает хорошее согласие с экспериментом для каждого исследуемого газа лишь при температурах выше некоторого значения, вполне определенного для каждого вещества, и при не очень высоких давлениях. Расхождение результатов теории и практики в области низких температур и высоких давлений газов свидетельствует о непригодности при этих условиях упрощенной модели строения газов, в которой не учитываются размеры молекул и силы их взаимного притяжения.

Уравнение Ван-дер-Ваальса. В 1873 г. голландский физик Ван-дер-Ваальс показал, что согласие результатов теории и эксперимента оказывается значительно лучшим, если изменить представления о свойствах молекул и считать, что они не только отталкиваются при непосредственном соприкосновении, но еще и притягиваются сравнительно слабыми силами на расстояниях, сравнимых с размерами молекул. При движении молекулы вдали от стенок сосуда, в который заключен газ, на нее действуют силы притяжения соседних с ней газовых молекул, но равнодействующая всех этих сил в среднем равна нулю, так как молекула испытывает одинаковое притяжение по всем направлениям.

При приближении одной молекулы к стенке сосуда все остальные молекулы газа оказываются по одну сторону от нее и равнодействующая всех сил взаимодействия направлена от стенки сосуда. Молекулы газа своим притяжением как бы притормаживают каждую молекулу, движущуюся к стенке сосуда, и уменьшают величину импульса, передаваемого молекулой стенке сосуда. В результате давление газа на стенки сосуда оказывается меньшим, чем оно было бы в отсутствие сил притяжения между молекулами.

Уменьшение импульса, переданного одной молекулой при ударе о стенку, пропорционально силе притяжения, действующей на эту молекулу со стороны ее ближайших соседей, т. е. пропорционально концентрации молекул n . Полный же импульс, передаваемый всеми молекулами газа стенкам сосуда, в свою очередь пропорционален их концентрации n . Таким образом, взаимное притяжение газовых молекул уменьшает давление газа на стенки сосуда на величину, пропорциональную n^2 , или для заданной массы газа m обратно пропорциональную квадрату занимаемого газом объема V .

Уравнение состояния для одного моля идеального газа ($m = M$) можно записать в виде

$$p = \frac{RT}{V}.$$

Для одного моля реального газа с учетом эффекта взаимного притяжения молекул уравнение состояния запишется в виде

$$p = \frac{RT}{V} - \frac{a}{V^2},$$

или

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)V = RT. \quad (1.19)$$

Приведенные рассуждения могут показаться неправдоподобными, так как в них учитывается притяжение между молекулами газа, но не учитывается возможность существования сил притяжения между молекулами газа и молекулами стенки сосуда. И так как концентрация молекул в твердом веществе обычно значительно превосходит концентрацию их в газе, притяжение молекул стенок сосуда, казалось бы, должно значительно превосходить противоположно направленное притяжение молекул газа.

На молекулу газа, приближающуюся к стенке сосуда, конечно, действуют силы притяжения ее молекул, и величина их может быть большой. Но независимо от величины этих сил их влияние на процесс взаимодействия молекулы со стенкой сосуда в конечном счете оказывается нулевым и поэтому не учитывается.

Вторую поправку в уравнение, описывающее состояние реального газа, Ван-дер-Ваальс ввел, руководствуясь следующими соображениями. Молекулы реального газа занимают часть объема сосуда, и движение молекул газа происходит как бы не во всем объеме V сосуда, а в уменьшенном на некоторую величину b . С введением второй поправки уравнение состояния реального газа для одного моля приобретает вид:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT.$$

Это уравнение называется уравнением Ван-дер-Ваальса.

Хотя уравнение Ван-дер-Ваальса дает лучшее согласие теории с результатами эксперимента, точность расчетов, выполненных на его основе, обычно оказывается недостаточной для решения практических задач на уровне требований современной техники. Поэтому в практике приходится использовать уравнения состояния реального газа еще более сложного вида. Уравнение же Ван-дер-Ваальса интересно тем, что дает качественное объяснение основных отличий в поведении реального газа от идеального.

§ 9. СРЕДНЯЯ ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА

Одним из важнейших отличий реальных газов от воображаемого идеального газа являются конечные размеры молекул любого реального газа. Вследствие этого молекулы реального газа испытывают столкновения не только со стенками сосуда, но и друг с другом. Поэтому одним из основных параметров реального газа является средняя длина свободного пробега его молекул.

Длиной свободного пробега молекулы газа называется длина пути, пройденного ею между двумя последовательными столкновениями (рис. 6). Так как молекулы газа распределены в пространстве беспорядочно, движутся во всевозможных направлениях и с различными скоростями, то длина пути между каждыми двумя последовательными столкновениями молекулы оказывается величиной непостоянной. Однако можно найти среднее значение длины свободного пробега молекулы газа для большого числа столкновений и пользоваться этим параметром для характеристики газа.

Среднюю длину свободного пробега λ можно вычислить теоретически, если известны радиус молекул r и концентрация их в единице объема n . При расчетах будем считать, что молекулы газа при столкновении ведут себя как упругие шары, отталкивающиеся только при соприкосновении, когда расстояние между их центрами равно удвоенному радиусу $2r$. Силы взаимного притяжения молекул во внимание принимать не будем.

Для определения средней длины свободного пробега вычислим сначала число столкновений, которое испытывает молекула за 1 с. Мы предположили, что молекулы взаимодействуют друг с другом при сближении до расстояния $2r$. Следовательно, при движении одной молекулы с ней испытывают соударения все молекулы

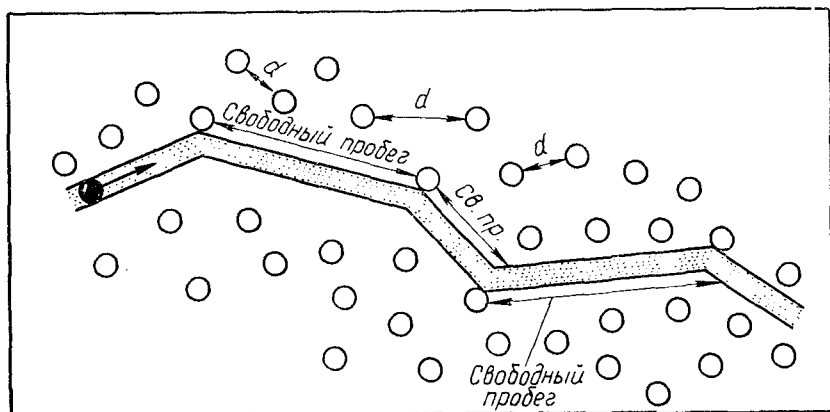


Рис. 6. Движение молекул газа характеризуется длиной свободного пробега

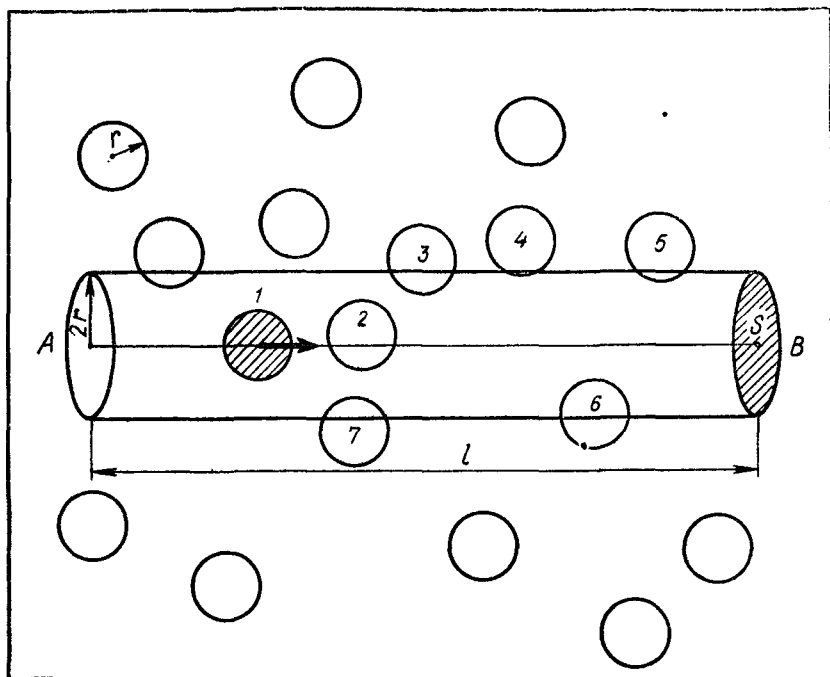


Рис. 7. Отрезок пути молекулы в газе

центры которых оказываются внутри цилиндра с радиусом $2r$ и осью, совпадающей с траекторией движения центра молекулы. Если считать остальные молекулы неподвижными, то молекула 1 при движении вдоль отрезка AB (рис. 7) столкнулась бы лишь с молекулами 2 и 6, центры которых лежат внутри цилиндра радиусом $2r$ с осью AB . Молекулы 3, 4, 5, 7 столкновения с молекулой 1 не испытали бы, так как их центры находились вне этого цилиндра. Если средняя скорость движения молекулы равна \bar{v} , то для определения числа соударений ν , испытываемых ею за 1 с, необходимо найти число молекул, центры которых попадают внутрь цилиндра с радиусом $R = 2r$ и длиной $l = \bar{v} \cdot 1 \text{ с}$. Очевидно, что это число ν можно определить как произведение объема цилиндра $V_{\text{ц}}$ на концентрацию молекул газа:

$$\nu = V_{\text{ц}} n = S l n = \pi (2r)^2 \bar{v} n = 4\pi r^2 n \bar{v}. \quad (1.20)$$

Разделив путь l , пройденный молекулой за 1 с, на число столкновений ν , испытанных ею за это время, получим среднюю длину свободного пробега λ :

$$\lambda = \frac{l}{\nu} = \frac{\bar{v} \cdot 1 \text{ с}}{4\pi r^2 \bar{v} n} = \frac{1}{4\pi r^2 n}. \quad (1.21)$$

После вывода формул для вычисления средней длины свободного пробега молекулы и частоты ее столкновений с другими молекулами можно произвести интересный анализ физического смысла полученных результатов.

Обратим сначала внимание на то, что произведение $4\pi r^2 n$ определяет площадь поверхности всех молекул, заключенных в единице объема газа, если считать молекулы шариками радиусом r . Тогда из выражения (1.21) следует, что средняя длина свободного пробега молекулы газа во столько раз меньше единицы длины, во сколько раз площадь поверхности всех молекул газа в единице объема больше единицы площади.

§ 10. ДИФFUЗИЯ И БРОУНОВСКОЕ ДВИЖЕНИЕ

Диффузия в газах. Покажем теперь, что если молекула газа при каждом столкновении изменяет направление движения совершенно случайным образом, то среднее расстояние s , на которое удалится молекула от первоначального своего местонахождения за время t , можно определить, если известны средняя длина ее свободного пробега λ и средняя частота столкновений ν .

Кажется правдоподобным предположение, что результатом хаотического блуждания каждой молекулы должно быть «топтание» ее вблизи одного и того же места, сколько бы времени ни прошло.

Однако простые наблюдения за процессами диффузии заставляют отказаться от этого предположения. В комнате, где только что выкрашены полы или стены, запах краски ощущается в любой точке пространства комнаты и даже за ее пределами, а не только вблизи окрашенных поверхностей. Значит, молекулы растворителя, испарившись с окрашенной поверхности, не «толкнутся» вблизи места своего освобождения, а удаляются от него на большие расстояния.

Попытаемся найти математическое выражение зависимости от времени t среднего расстояния s , на которое удаляется молекула от первоначального положения.

Для упрощения вывода будем считать, что движение молекулы происходит в плоскости $ХОУ$. Это предположение не изменяет ни способа, ни строгости вывода.

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ молекула находилась в точке O , которую примем за начало координат. Через время t , достаточно большое по сравнению со средним временем между двумя последующими столкновениями, она окажется в некоторой точке M с координатами x, y (рис. 8). Вектор перемещения \vec{s} является результатом сложения векторов $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3$ и т. д. до \vec{s}_n , каждый из которых представляет собой вектор перемещения молекулы между двумя последующими столкновениями.

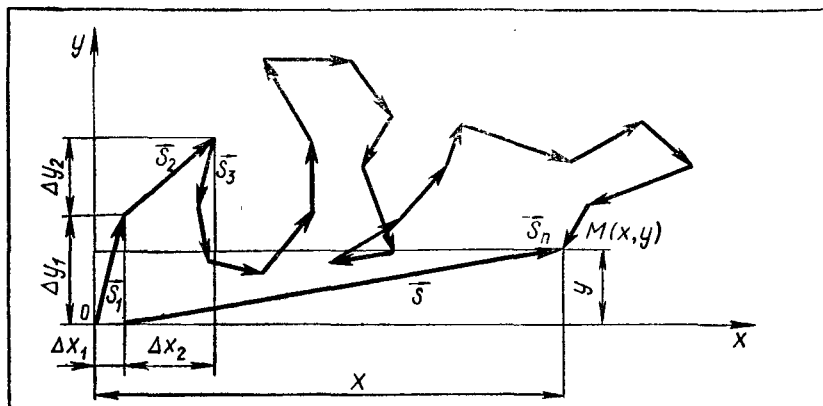


Рис. 8. Траектория хаотического движения молекулы в газе

Модуль вектора перемещения \vec{s} определяется выражением:

$$s^2 = x^2 + y^2, \quad s = \sqrt{x^2 + y^2},$$

где x и y — координаты конца вектора перемещения \vec{s} , или, что то же самое, координаты молекулы. Очевидно, что координаты молекулы x и y в момент времени t могут быть найдены путем сложения соответствующих изменений ее координат Δx и Δy , происходящих при каждом перемещении молекулы между двумя последующими столкновениями. Изменения координат Δx и Δy представляют собой проекции на оси координат вектора перемещения молекулы между двумя столкновениями. Значения координат молекулы в момент времени t определяются выражениями:

$$x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_N, \quad y = \Delta y_1 + \Delta y_2 + \dots + \Delta y_N,$$

откуда

$$\begin{aligned} s &= \sqrt{x^2 + y^2} = \\ &= \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_N^2 + 2\Delta x_1\Delta x_2 + \dots + \Delta y_1^2 + \Delta y_2^2 + \dots + \Delta y_N^2 + 2\Delta y_1\Delta y_2 + \dots} = \\ &= \sqrt{(\Delta x_1^2 + \Delta y_1^2) + \dots + (\Delta x_N^2 + \Delta y_N^2) + 2\Delta x_1\Delta x_2 + \dots + 2\Delta y_1\Delta y_2 + \dots}. \end{aligned}$$

Так как движение молекулы хаотично, то изменения ее координат происходят с одинаковой вероятностью как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Следовательно, в подкоренном выражении слагаемые, представляющие собой смешанные произведения типа $2\Delta x_i\Delta x_k$ и $2\Delta y_i\Delta y_k$, одинаково часто встречаются со знаками «плюс» и «минус». Так как по абсолютной величине все они лежат в пределах от нуля до величины порядка λ^2 , при достаточно большом числе слагаемых их сумма с большой степенью точности может

считаться равной нулю. Сумма остальных слагаемых может быть представлена как сумма N квадратов перемещений молекулы, которая равна по определению произведению числа N на квадрат средней длины свободного пробега λ :

$$s \approx \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_N^2} \approx \sqrt{N\lambda^2},$$

$$s = \sqrt{N} \cdot \lambda. \quad (1.22)$$

Таким образом, мы получили, что *модуль перемещения молекулы за время t пропорционален корню квадратному из числа столкновений N , испытанных ею за это время, и средней длине свободного пробега λ* . Отсюда связь между модулем перемещения s , временем t и средней скоростью молекулы \bar{v} определяется выражением:

$$s = \sqrt{N} \cdot \lambda = \sqrt{\frac{\bar{v}t}{\lambda}} \cdot \lambda = \sqrt{\bar{v}t\lambda}. \quad (1.23)$$

Полученное соотношение открывает возможность определения средней длины свободного пробега газовых молекул λ по экспериментальным данным о среднем значении перемещения s молекул газа путем диффузии за известное время t и вычисленной средней скорости их движения \bar{v} .

Скорость диффузии. Интересно сравнить скорость диффузионного распространения молекул газа со средней скоростью их теплового движения.

Выполним расчет для воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре 20°C . Средняя скорость теплового движения молекул газов воздуха при этих условиях составляет примерно 500 м/с , средний свободный пробег их около $6 \cdot 10^{-8} \text{ м}$, тогда среднее значение модуля перемещения s молекулы за одну секунду равно:

$$s = \sqrt{500 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 1 \text{ с} \cdot 6 \cdot 10^{-8} \text{ м}} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

При нормальных условиях молекула газа пробегает за одну секунду путь около $0,5 \text{ км}$, но из-за хаотических изменений направления движения в результате большого числа столкновений с другими молекулами смещается от своего первоначального положения в среднем всего на $0,5 \text{ см}$!

Здесь следует обратить внимание на то, что процесс диффузии газовых молекул нельзя охарактеризовать понятием средней скорости диффузии, как это хотелось бы сделать. Объясняется это тем, что модуль среднего перемещения s молекулы пропорционален времени не в первой степени, а в степени $1/2$. Следовательно, скорость диффузии является не постоянной величиной, а убывает с увеличением интервала времени.

Законы броуновского движения. Броуновское движение частиц обнаруживает большое сходство с диффузионным движением молекул и атомов.

Беспорядочное движение мелких твердых частиц, находящихся в жидкости или газе, впервые обнаружил в 1827 г. при наблюдении в микроскоп английский ботаник Броун. Это явление смогла объяснить лишь молекулярно-кинетическая теория на основе использования представлений о существовании молекул. Молекулы жидкости или газа сталкиваются с твердой частицей и изменяют направление и модуль скорости ее движения. Число молекул, ударяющих частицу с различных сторон, и направление передаваемого ими импульса непостоянны во времени. Чем меньше размеры и масса частицы, тем более заметными становятся изменения ее импульса во времени.

Сам факт обнаружения броуновского движения часто называют доказательством справедливости молекулярно-кинетической теории. Однако более точным будет утверждение, что факт существования броуновского движения свидетельствует о молекулярном строении вещества и движении молекул.

Действительно, решающими экспериментами были опыты французского физика Жана Перрена по изучению количественных закономерностей броуновского движения, выполненные в 1908—1911 гг.

Эти опыты были поставлены после того, как А. Эйнштейн в 1905 г., используя молекулярно-кинетическую теорию, разработал теорию броуновского движения. А. Эйнштейн доказал, что хаотическое движение броуновской частицы должно подчиняться закону:

$$\overline{\Delta x^2} = b \frac{T \cdot \Delta t}{N_A}, \quad (1.24)$$

где $\overline{\Delta x^2}$ — средний квадрат смещения броуновской частицы за время Δt , T — температура, N_A — число Авогадро, b — постоянная, зависящая от формы и размеров броуновской частицы и свойств жидкости.

Опыты Перрена показали, что закономерности броуновского движения, предсказанные молекулярно-кинетической теорией, полностью подтверждаются экспериментом, т. е. средний квадрат смещения броуновской частицы прямо пропорционален абсолютной температуре газа или жидкости и первой степени интервала времени, за которое происходит смещение. Это совпадение результатов теории и эксперимента является одним из решающих доказательств справедливости основных положений молекулярно-кинетической теории.

§ 11. СЖИЖЕНИЕ ГАЗОВ

Пары и «постоянные газы». Примерно до середины XIX в. вещества в газообразном состоянии разделялись на пары и «постоянные газы». «Постоянными газами» называли такие, например, газы, как кислород, азот, водород, которые не удавалось перевести в жидкое состояние путем повышения давления.

Догадку об отсутствии принципиального различия между парами и «постоянными газами» высказывал еще в конце XVII в. Лавуазье. Он считал, что при достаточно низкой температуре в жидкость превратится и атмосферный воздух. Первым из постоянных газов был сжижен аммиак при повышении давления до $7 \cdot 10^5$ Па. В 1823 г. Майкл Фарадей удалось превратить в жидкость газ хлор путем охлаждения его при повышенном давлении. В 1877 г. французский инженер Кальет и швейцарский физик Пикте независимо друг от друга добились сжижения кислорода при повышении давления примерно до $3 \cdot 10^7$ Па и охлаждении до температуры ниже -140 °С. В том же году был сжижен азот. В 1898 г. английский физик Дьюар добился сжижения водорода, а в 1908 г. в Голландии Камерлинг-Оннес перевел в жидкое состояние гелий — последний газ, который до него никому не удавалось превратить в жидкость.

Таким образом, было установлено, что из газообразного состояния в жидкое можно перевести любое вещество. Однако каждое вещество может испытывать такое превращение лишь при температурах ниже определенной, так называемой критической температуры T_k . При температуре выше критической вещество не превращается в жидкость или твердое тело ни при каких значениях давления. Очевидно, что при критической температуре средняя кинетическая энергия теплового движения молекул вещества превышает потенциальную энергию их связи в жидкости или твердом теле. Так как силы притяжения, действующие между молекулами различных веществ, различны, неодинакова и потенциальная энергия их связи, отсюда различными оказываются и значения критической температуры для различных веществ.

Сжижение газов. Рассмотрим основные принципы, используемые в машинах для сжижения газов. Первое условие, которое необходимо выполнить для превращения газа в жидкость, — это охлаждение его до температуры ниже критической. При температуре ниже критической любой газ может быть переведен в жидкое состояние путем повышения давления, поэтому сжижение газов, имеющих критическую температуру выше 0 °С, не представляет принципиальной трудности. Более сложной задачей является сжижение газов, критическая температура которых значительно ниже нуля. Такими газами являются кислород, азот, водород, гелий, критические температуры которых равны соответственно $-118,4$, $-146,9$, -240 и -268 °С. Такие низкие температуры не встречаются на Земле в естественных условиях, поэтому проблема сжижения этих газов оказывается тесно связанной с проблемой получения низких температур. Основной способ, используемый для охлаждения газа, — его расширение с совершением работы.

Компрессионный холодильник. С простейшей машиной, в которой производится сжижение газа, можно ознакомиться на примере домашнего компрессионного холодильника (цветная вклейка I).

Рабочим телом в холодильнике служит газ фреон. Фреоном заполнена система конденсатора и испарителя. Компрессор, приводимый в действие электродвигателем, откачивает газообразный фреон из испарителя и нагнетает его в конденсатор. При сжатии фреон нагревается. Охлаждение его до комнатной температуры производится в конденсаторе, расположенном обычно на задней стенке холодильного шкафа. Охлажденный до комнатной температуры при повышенном давлении, создаваемом в конденсаторе с помощью компрессора, фреон переходит в жидкое состояние. Из конденсатора жидкий фреон через капиллярную трубку поступает в испаритель. Откачкой паров фреона из испарителя с помощью компрессора в нем поддерживается пониженное давление. При пониженном давлении в испарителе жидкий фреон кипит и испаряется даже при температуре ниже 0°C . Теплота на испарение фреона отбирается от стенок испарителя, вызывая их охлаждение. Откачанные пары фреона поступают в кожух компрессора, оттуда снова в конденсатор и т. д. по замкнутому циклу.

Самая низкая температура, которая может быть получена в испарителе (морозильной камере), определяется значением давления паров фреона, так как температура кипения фреона, как и любой другой жидкости, понижается с понижением давления. При постоянной скорости поступления жидкого фреона в испаритель через капиллярную трубку из конденсатора давление паров фреона в испарителе будет тем ниже, чем дольше работает компрессор. Если нет нужды добиваться понижения температуры в испарителе до предельно достижимого значения, то работа компрессора периодически останавливается путем выключения электромотора, приводящего его в действие. Компрессор выключается автоматом, следящим за поддержанием в холодильном шкафу заданной температуры.

§ 12. ОБЛАКА И ОСАДКИ

Образование облаков. В летний день земная поверхность, поглощающая большую часть падающего на нее солнечного излучения, имеет более высокую температуру, чем прозрачный атмосферный воздух. Слой воздуха, находящийся у поверхности Земли, нагревается больше, чем слой воздуха, расположенный над ним, так как, кроме излучения Солнца, он подогревается еще и снизу земной поверхностью.

Поверхность Земли неоднородна. На ней имеются холмы и долины, леса и степи, моря и горы, поэтому нагревание земной поверхности и прилегающего к ней слоя воздуха в различных местах оказывается неодинаковым. Воздух над участком поверхности Земли, имеющим повышенную температуру по сравнению с соседними участками, в результате нагревания при постоянном давлении расширяется. Понижение плотности воздуха при расширении приводит

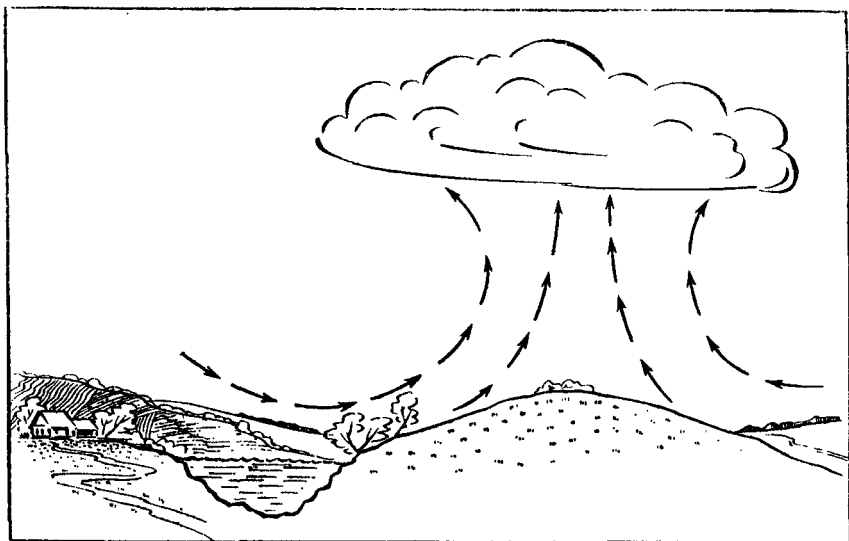


Рис. 9. Грозовое облако образуется в восходящем потоке воздуха

к тому, что он «всплывает» вверх, а его место занимает более плотный и холодный воздух из соседних участков (рис. 9).

Однако на этом процесс не прекращается. Подъем некоторого количества теплого воздуха в более высокие слои атмосферы сопровождается его дальнейшим расширением, так как по мере удаления от поверхности Земли давление в атмосфере уменьшается. Расширение воздуха при подъеме сопровождается его охлаждением.

Процесс охлаждения газа при расширении можно объяснить качественно следующим образом. Если объем сосуда, в который заключен газ, увеличивается за счет того, что одна из стенок сосуда удаляется от противоположной стенки со скоростью v , то соударения молекул газа с этой «убегающей» стенкой будут приводить к уменьшению их скорости после каждого удара. Уменьшение средней кинетической энергии теплового движения молекул в результате таких соударений и есть причина понижения температуры газа при расширении.

Для сухого воздуха подъем на 100 м по вертикали сопровождается охлаждением примерно на 1°C (рис. 10). Очевидно, что подъем нагретого воздуха будет продолжаться до тех пор, пока его температура в результате охлаждения при расширении не сравняется с температурой воздуха на достигнутой высоте.

При подъеме и охлаждении воздуха, содержащего пары воды, на некоторой высоте водяной пар из ненасыщенного становится пересыщенным, происходит конденсация пара и возникает облако, состоящее из мелких водяных капель. Высота нижней границы

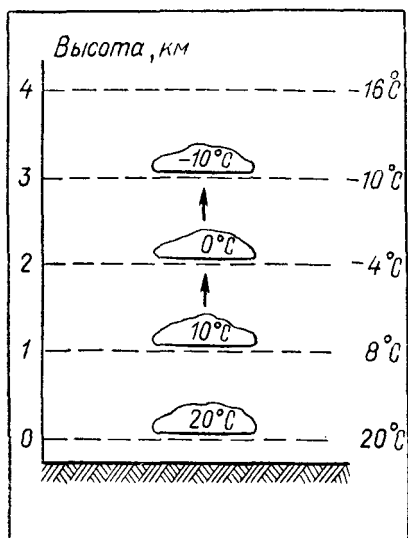


Рис. 10. Изменение температуры воздуха при его подъеме

облака определяется условием охлаждения поднимающегося воздуха до точки росы.

Процесс конденсации водяного пара в облаке сопровождается выделением тепла, поэтому воздух в облаке охлаждается менее интенсивно, чем вне его. Процесс дальнейшего его расширения и подъема продолжается. Облака могут иметь протяженность по вертикали свыше 10 км. Их вершины при этом даже в жаркий летний день находятся в слоях воздуха с температурой ниже 0°C и состоят не из водяных капель, а из кристаллов льда.

После выяснения механизма образования облаков, естественно, возникает вопрос: почему они не падают на Землю? Ответить на этот вопрос несложно.

Как показали экспериментальные исследования структуры облаков, размеры водяных капель в них лежат в пределах от 2 до 70 мкм. Капли таких малых размеров падают в воздухе с очень малой скоростью. Например, скорость падения капли радиусом 10 мкм составляет всего 1 см/с. Эффект уменьшения скорости падения капли с убыванием ее радиуса объясняется тем, что сила тяжести пропорциональна объему капли, т. е. кубу ее радиуса: $F \sim V \sim r^3$, а сила сопротивления воздуха пропорциональна скорости движения капли и площади ее поперечного сечения, т. е. квадрату ее радиуса: $F_c \sim vS \sim vr^2$.

С уменьшением радиуса капли r сила тяжести убывает быстрее, чем сила сопротивления воздуха, и эти силы оказываются уравновешенными при все меньших значениях скорости движения v .

Осадки. Если процесс конденсации пара в облаке идет более интенсивно, чем процесс испарения капель воды на поверхности облака, развитие облака может завершиться выпадением из него дождя, снега или града.

Образование осадков в облаке происходит примерно следующим образом. По мере подъема вверх восходящим воздушным потоком водяные капли в результате процесса конденсации пара все увеличиваются в размерах. Этот процесс продолжается до тех пор, пока размеры капли не станут такими, что скорость ее падения превысит скорость подъема восходящего потока воздуха в облаке. Капли, падающие вниз, встречают на своем пути более мелкие капли, поднимающиеся вверх, сливаются с ними, укрупняются. Процесс

продолжается до тех пор, пока они не выпадут из облака в виде дождя.

Особенно эффективно происходит образование осадков, если вершина облака состоит из кристалликов льда. При достижении критических размеров кристаллики льда начинают падать. Процесс конденсации пара на их поверхности в нижних слоях облака протекает гораздо интенсивнее, чем на поверхности капель. В результате из облака выпадает снег, который на пути к поверхности Земли может растаять и выпасть в виде дождя.

§ 13. ЗАВИСИМОСТЬ АГРЕГАТНОГО СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

Диаграмма состояний вещества. Чем выше температура жидкости, тем больше плотность и давление ее насыщенного пара. Геометрическим местом точек, отмечающих на диаграмме $p - T$ равновесное состояние между жидким и газообразным агрегатными состояниями вещества, является кривая AK зависимости температуры кипения жидкости от давления (рис. 11). Точкам, лежащим выше кривой AK , но вправо от кривой AB , соответствуют такие сочетания температуры и давления, при которых вещество находится в жидком состоянии. Точкам, лежащим ниже кривой паробразования CAK , соответствуют такие сочетания давления и температуры, при которых вещество находится в газообразном состоянии.

Геометрическим местом точек, отмечающих равновесные состояния между твердым и жидким состояниями вещества, является кривая плавления AB . При давлениях и температурах, соответствующих точкам этой кривой, твердое тело и расплав, приведенные в соприкосновение, находятся в динамическом равновесии. Число молекул, переходящих в единицу времени из жидкости в твердое тело, равно числу молекул, переходящих границу раздела между ними в противоположном направлении.

Кривая плавления идет почти вертикально, поскольку температура плавления слабо зависит от давления. На рисунке 11 она немного отклонена вправо.

Этим иллюстрируется повышение температуры плавления с увеличением давления, наблюдаемое у большинства веществ.

Для веществ, обладающих в твердом состоянии меньшей плотностью, чем в жидком состоянии (лед, висмут, серый чугун), увеличение давления способствует плавлению. Для таких веществ кривая плавления отклонена влево от вертикали.

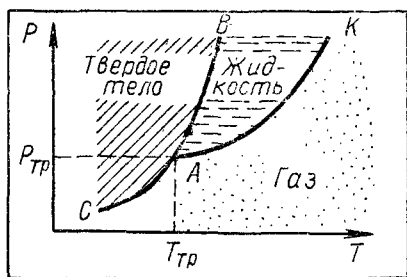


Рис. 11. Диаграмма состояний вещества

Кривая SA на диаграмме состояний вещества отмечает сочетание значений давления и температуры, при которых устанавливается равновесие между процессами испарения молекул (атомов) твердого тела и конденсации их на поверхность твердого тела. *Процесс испарения твердых тел называется сублимацией.*

Конечно, сублимации сопутствует и обратный процесс — кристаллизация из пара. При определенных сочетаниях температуры и давления система кристалл — пар будет находиться в динамическом равновесии. С уменьшением температуры кристалла уменьшается и давление его насыщенного пара. Это отражено в ходе кривой сублимации SA .

Тройная точка. Кривые плавления и парообразования пересекаются в точке A . Эта точка называется тройной точкой, так как если при давлении $p_{тр}$ и температуре $T_{тр}$ некоторые количества одного вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях находятся в контакте, то без подведения или отвода тепла количество вещества, находящегося в каждом из трех состояний, остается неизменным.

Рассмотрение диаграммы состояний вещества позволяет сделать вывод, что переход вещества при нагревании из твердого состояния в жидкое, наблюдаемый в большинстве обычных опытов, не является обязательным правилом. Он лишь свидетельствует о том, что у многих веществ давление $p_{тр}$ ниже нормального атмосферного давления p_n . Те же вещества, у которых давление $p_{тр}$ превышает p_n , в результате нагревания при давлении p_n не плавятся, а переходят в газообразное состояние.

Например, при давлении p_n твердая углекислота при нагревании не плавится, а сублимирует. Это объясняется тем, что тройной точке соединения CO_2 соответствует давление примерно в 5 раз выше p_n .

Полиморфизм. Разнообразие возможных состояний вещества не исчерпывается тремя видами: твердым, жидким, газообразным. Практически все вещества в твердом состоянии могут существовать в двух или более кристаллических разновидностях (модификациях), отличающихся физическими свойствами. Это явление называется полиморфизмом. Известны четыре модификации железа, девять модификаций серы и т. д. Каждая модификация устойчива в определенном интервале температур и давлений. Из девяти кристаллических разновидностей воды только одна устойчива при атмосферном давлении. Остальные восемь модификаций льда существуют при высоких давлениях и имеют плотность большую, чем у воды. Одна из них при давлении $2 \cdot 10^9$ Па имеет температуру плавления $+80^\circ C$, т. е. существует горячий лед.

Упорядоченное расположение атомов или молекул в кристалле определяется действием сил межатомного и межмолекулярного взаимодействия. Тепловое движение атомов и молекул нарушает эту упорядоченную структуру. При изменениях температуры и давления изменяются средние расстояния между атомами и моле-

кулами. Это приводит к изменению величины сил взаимодействия между ними. С повышением температуры увеличивается размах тепловых колебаний атомов и молекул и им требуется больший объем, в котором они могли бы двигаться. При каждом сочетании давления и температуры реализуется тот тип укладки частиц, который в данных условиях наиболее устойчив.

Превращения кристаллов одного и того же вещества с различным типом решетки друг в друга происходят по законам, аналогичным законам плавления и испарения. Каждому давлению соответствует определенная температура, при которой оба типа кристаллов существуют, не превращаясь друг в друга, так как полиморфные переходы сопровождаются выделением или поглощением тепла.

На диаграмме состояний области, соответствующие различным кристаллическим модификациям, разграничиваются кривыми, представляющими собой геометрические места точек, отвечающих таким значениям давлений и температур, при которых две кристаллические модификации находятся в динамическом равновесии между собой (рис. 12).

Знание законов полиморфных превращений имеет важное значение в практике.

У многих кристаллов неустойчивая в данных условиях модификация может существовать длительное время, поскольку атомы твердого тела обладают ничтожно малой подвижностью. Например, алмаз при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении не превращается самопроизвольно в более устойчивую при этих условиях модификацию — графит. Поэтому алмазы, полученные при высоких температурах и давлениях, можно использовать в обычных условиях.

Разработка способа получения искусственных алмазов из графита имеет большую практическую ценность. Превращение графита в алмаз происходит при температуре 2000°C и давлении 10^{10} Па в течение нескольких часов. Эта труднейшая научно-техническая задача в нашей стране была решена в 1962 г. в Институте физики высоких давлений под руководством академика Л. Ф. Верещагина.

Искусственные алмазы в настоящее время изготавливаются в значительных количествах и широко применяются в промышленности.

Приведем еще один пример применения явления полиморфизма.

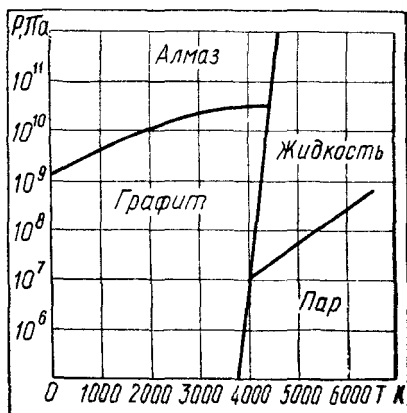


Рис. 12. Диаграмма состояний углерода

Железо может существовать в нескольких кристаллических модификациях. При температуре ниже 898°C атомы железа образуют кубическую объемно-центрированную решетку (α -железо). В интервале температур $910\text{—}1400^{\circ}\text{C}$ более устойчивой оказывается гранецентрированная решетка (γ -железо). Если сталь нагреть до температуры выше температуры полиморфного перехода от α - к γ -модификации и затем быстро охладить, то перестройка кристаллической решетки из γ - в α -модификацию не успеет произойти. Образец с γ -структурой при комнатной температуре обладает повышенной твердостью и прочностью. Это полиморфное превращение наряду с другими явлениями сопровождает процесс закалки стали и имеет большое значение в технике.

§ 14. СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллические тела. Кристаллическими называются твердые тела, физические свойства которых неодинаковы в различных направлениях, но совпадают в параллельных направлениях. Именно анизотропия физических свойств, а не геометрически правильная форма является важнейшим признаком кристаллического тела (см. передний форзац).

Простейший пример анизотропии кристаллов — неодинаковая их прочность по различным направлениям. Это свойство наглядно проявляется при дроблении многих кристаллических тел. Результаты опыта по раскалыванию двух тел, одно из которых было аморфным, а другое кристаллическим, представлены на фотографиях 2—5.

Стеклообразная бусина с плоскими гранями раскололась на части различной формы, не имеющие плоских участков поверхности. Это свидетельствует об отсутствии анизотропии механической прочности в стекле.

Кусок каменной соли при раскалывании разделится на части, ограниченные плоскими поверхностями, пересекающимися под одинаковыми углами.

Очевидно, эти плоскости перпендикулярны особым направлениям в образце каменной соли, по которым его прочность минимальна. Существование направлений с особыми механическими свойствами, т. е. анизотропия образца каменной соли, доказывает его кристаллическую природу.

Замечательное свойство многих кристаллов давать при дроблении осколки, подобные друг другу по форме, позволило французскому ученому Рене Гаюи высказать в конце XVIII в. гипотезу, что все кристаллы состоят из плотно уложенных рядами маленьких, невидимых в микроскоп частиц, имеющих присущую данному веществу геометрическую форму.

Многообразие геометрических форм кристаллов Гаюи объяснял не только различной формой «кирпичиков», из которых они состоят, но и различными способами их укладки.

Плотная упаковка. Английский ученый Роберт Гук и голландский ученый Христиан Гюйгенс обратили внимание на возможность построения правильных многогранников из плотно укладываемых шаров. Они предположили, что кристаллы построены из шарообразных частиц — атомов или молекул. Внешние формы кристаллов согласно этой гипотезе являются следствием особенностей плотной упаковки атомов или молекул. Независимо от них к такому же выводу пришел в 1748 г. великий русский ученый Михаил Васильевич Ломоносов.

При плотнейшей укладке шаров в один плоский слой каждый шар оказывается окруженным шестью другими шарами, центры которых образуют правильный шестиугольник (рис. 13, а). Если укладку второго слоя вести по лункам между шарами первого слоя, то второй слой окажется таким же, как и первый, только смещенным относительно него в пространстве (рис. 13, б).

Укладка третьего слоя шаров может быть осуществлена двумя способами (рис. 13). В первом способе шары третьего слоя укладываются в лунки, находящиеся точно над шарами первого слоя, и третий слой оказывается точной копией первого. При последующем повторении укладки слоев этим способом получается структура, называемая гексагональной плотноупакованной

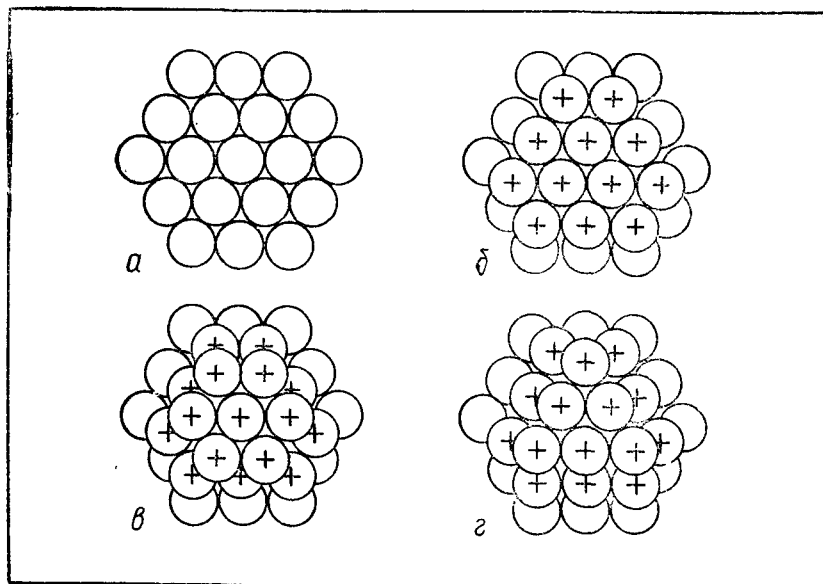


Рис. 13. Два способа плотнейшей упаковки равновеликих шаров:

а — укладка одного слоя шаров; б — укладка двух слоев шаров; в — гексагональная упаковка трех слоев шаров; г — кубическая упаковка трех слоев шаров

ной структурой (рис. 13, в). Во втором способе шары третьего слоя укладываются в лунки, не находящиеся точно над шарами первого слоя. При этом способе упаковки получается структура, называемая кубической плотноупакованной структурой (рис. 13, г). Обе упаковки дают степень заполнения объема 74%. Никакой другой способ расположения шаров в пространстве при условии отсутствия их деформации большей степени заполнения объема не дает.

При укладке шаров ряд за рядом способом гексагональной плотной упаковки можно получить правильную шестигранную призму, второй способ упаковки ведет к возможности построения куба из шаров.

Если при построении кристаллов из атомов или молекул действует принцип плотной упаковки, то, казалось бы, в природе должны встречаться кристаллы только в виде кубов и шестигранных призм. Кристаллы такой формы действительно очень распространены. Гексагональной плотной упаковке атомов соответствует, например, форма кристаллов цинка, магния, кадмия. Кубической плотной упаковке соответствует форма кристаллов меди, алюминия, серебра, золота и ряда других металлов.

Но этими двумя формами многообразие мира кристаллов вовсе не ограничивается. Существование форм кристаллов, не соответствующих принципу плотной упаковки равновеликих шаров, может иметь разные причины.

Во-первых, кристалл может быть построен с соблюдением принципа плотной упаковки, но из атомов разных размеров (рис. 14). Во-вторых, отличие упаковки атомов или молекул от плотнейшей может быть вызвано различием сил связей между атомами или молекулами по разным направлениям.

Пространственная решетка. Элементарная ячейка. Для наглядного представления внутренней структуры кристалла применяется способ его изображения с помощью пространственной кристаллической решетки — пространственной сетки, узлы которой совпадают с положением центров атомов или молекул в кристалле.

В основе кристаллической решетки лежит элементарная ячейка — фигура наименьшего размера, последовательным переносом которой можно построить весь кристалл.

Как правило, атом принадлежит не одной элементарной ячейке, а входит одновременно в состав нескольких соседних элементарных ячеек. Рассмотрим, к примеру, элементарную ячейку

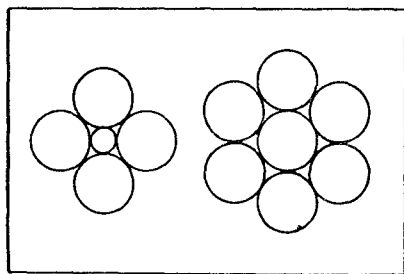


Рис. 14. Зависимость способа плотной упаковки от размеров шаров, укладываемых в один слой на плоскости

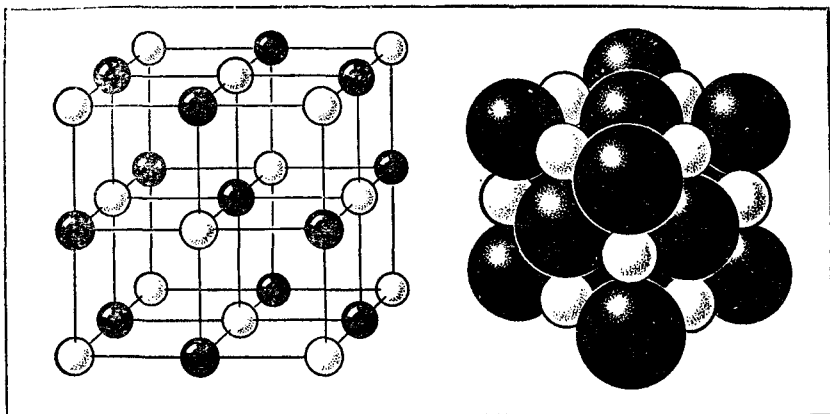


Рис. 15. Модель элементарной ячейки кристалла каменной соли

кристалла каменной соли, представленную на рисунке 15. От ионов, находящихся в вершинах ячейки, ей принадлежит лишь по одной восьмой иона; от ионов, лежащих на ребрах ячейки, ей принадлежит по одной четвертой каждого; от ионов, лежащих на гранях, на долю каждой из двух соседних элементарных ячеек приходится по половине иона.

Подсчитаем число ионов натрия и число ионов хлора, входящих в состав одной элементарной ячейки каменной соли. Ячейке целиком принадлежит один ион хлора, расположенный в центре ячейки, и по одной четверти каждого из 12 ионов, расположенных в ребрах ячейки. Всего ионов хлора в одной ячейке $1 + 12 \cdot 1/4 = 4$. Ионов натрия в элементарной ячейке шесть половинок на гранях и восемь «восьмушек» в вершинах. Всего ионов хлора в одной ячейке $6 \times 1/2 + 8 \cdot 1/8 = 4$.

Сравнение элементарных ячеек кристаллических решеток различного типа может проводиться по разным параметрам, среди которых часто употребляются атомный радиус, плотность упаковки и количество атомов в элементарной ячейке. *Атомный радиус определяют как половину расстояния между центрами ближайших соседних атомов в кристалле. Доля объема, занятая атомами в элементарной ячейке, называется плотностью упаковки.*

На рисунке 16 представлены объемные изображения элементарных ячеек четырех типов.

Симметрия кристаллов. Классификация кристаллов и объяснение их физических свойств оказываются возможными только на основе изучения их симметрии. Учение о симметрии является основой всей кристаллографии.

Для количественной оценки степени симметричности служат элементы симметрии — оси, плоскости и центр симметрии.

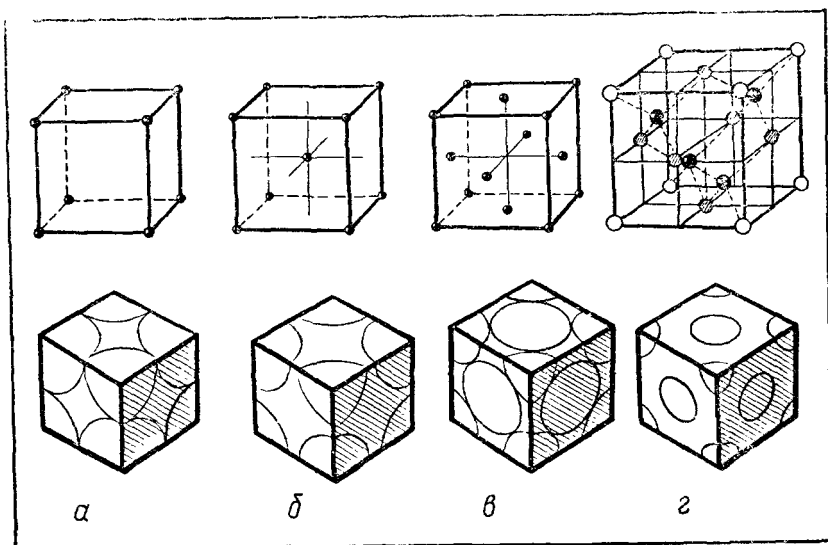


Рис. 16. Кубические ячейки и их объемные изображения:

а — простая кубическая; б — объемно-центрированная; в — гранцентрированная; г — решетка алмаза

Осью симметрии называют воображаемую прямую, при вращении вокруг которой на 360° кристалл (или его решетка) несколько раз совмещается сам с собой. Число этих совмещений называют порядком оси.

Плоскостью симметрии называют плоскость, рассекающую кристалл на две части, каждая из которых является зеркальным отображением одна другой. Плоскость симметрии как бы выполняет роль двустороннего зеркала. Число плоскостей симметрии может быть различным. Например, в кубе их девять, а в снежинках любой формы — шесть.

Центром симметрии называют точку внутри кристалла, в которой пересекаются все оси симметрии.

Каждый кристалл характеризуется определенным сочетанием элементов симметрии. Ввиду того что число элементов симметрии невелико, задача отыскания всех возможных форм кристаллов не является безнадежной. Выдающийся русский кристаллограф Е в гра ф Степанов и ч Федоров установил, что в природе может существовать только 230 различных кристаллических решеток, обладающих осями симметрии второго, третьего, четвертого и шестого порядка. Иначе говоря, кристаллы могут иметь форму различных призм и пирамид, в основании которых могут лежать только правильный треугольник, квадрат, параллелограмм и шестигульник.

Представления о периодической структуре кристаллов и симметрии расположения атомов в них в настоящее время имеют

строгое экспериментальное подтверждение. Фотография I получена с помощью ионного микропроектора от кристалла вольфрама. Пунктир из светлых точек на фотографии отмечает край слоя атомов, а сами светлые точки — отдельные атомы. Вся картина хорошо передает периодичность и симметрию расположения атомов вольфрама в кристалле.

§ 15. ПРОЦЕССЫ РОСТА КРИСТАЛЛОВ

Механизм роста кристаллов.

Долгое время считалось очевидным, что рост кристаллов происходит слой за слоем. Сначала завершается построение одного слоя, потом начинается укладка следующего и т. д. В результате грани, наращиваясь слой за слоем, перемещаются параллельно самим себе, как при кладке кирпичной стены. О справедливости такого предположения, казалось бы, говорят факты существования плоских граней у кристаллов. Ясно, что осаждение нового атома наиболее вероятно в точке A поверхности, где он будет удерживаться тремя соседями, так как в любой другой точке поверхности грани он будет удерживаться меньшим числом соседей (рис. 17). Когда закончится застройка четвертого ряда, начнется застройка пятого и т. д., пока не завершится вся плоскость.

После этого рост кристалла затрудняется, так как образование нового слоя — событие менее вероятное. В любом месте на завершённой плоскости атом будет связан с небольшим числом атомов кристалла. Вероятность того, что эта слабая связь будет нарушена тепловым движением, велика, поэтому атом не может закрепиться на кристалле.



Е. С. Федоров

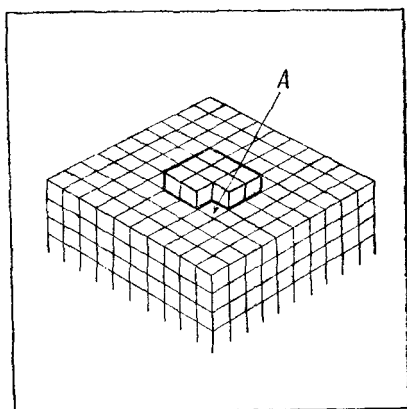


Рис. 17. Модель недостроенной грани кристалла

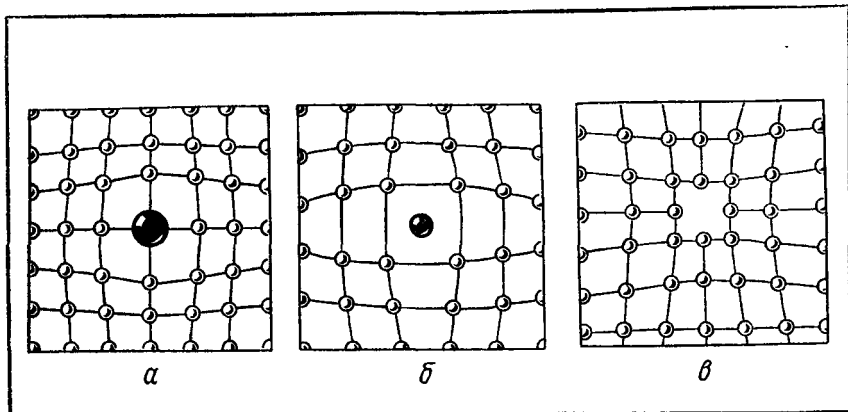


Рис. 18. Схемы возникновения дефектов в кристаллах

При таком механизме застройки атомных плоскостей скорость роста кристалла должна быть очень малой. В опыте же по выращиванию кристаллов из паров с пересыщением всего в 1% была обнаружена скорость роста кристалла в 10^{1000} раз больше рассчитанной теоретически! По-видимому, большего расхождения теории с опытом в физике не наблюдалось.

Дефекты в кристаллах. Объяснение этому расхождению теории и практики было найдено лишь сравнительно недавно, в 1949 г. Легкость, с какой начинается застройка новой атомной плоскости, оказалось возможным объяснить тем, что реальные кристаллы имеют множество дефектов структуры.

Описывая строение кристаллов, мы пользовались их идеальными моделями. Отличие реальных кристаллов от идеальных заключается в том, что реальные кристаллы не обладают правильной кристаллической решеткой, а имеют целый ряд нарушений в расположении атомов, называемых **дефектами**. Знание условий образования дефектов и способов их устранения играет большую роль при использовании кристаллов на практике.

Схемы возникновения дефектов в кристаллах показаны на рисунке 18. Самые простые дефекты в идеальной кристаллической решетке возникают в результате замещения собственного атома чужеродным, внедрения атома в междоузлие, отсутствия атома в одном из узлов кристаллической решетки.

Дислокации. Особую роль в процессе роста кристалла играют несовершенства его структуры, называемые **дислокациями** (смещениями). Простейшими видами дислокаций являются **краевая** и **винтовая**. **Краевая дислокация** образуется в месте обрыва «лишней» атомной полуплоскости (рис. 19). В случае **винтовой дислокации** атомные плоскости образуют систему, напоминающую винтовую лестницу. Количество

дислокаций в кристаллах может быть очень большим, достигая $10^8 - 10^9 \text{ см}^{-3}$. Кристаллов без дислокаций не существует. Постоянное наличие открытой ступеньки винтовой дислокации создает благоприятные условия для роста кристалла. Ведь не нужно начинать строить ни новый ряд, ни новую плоскость. Атомы, пристраивающиеся к ступенькам, наращивают ее, и за счет этого она начинает перемещаться по поверхности грани. Но это движение не будет перемещением ступеньки параллельно самой себе, так как один ее конец неподвижен. Нетрудно сообразить, что если атомы укладываются с постоянной скоростью вдоль всей длины ступеньки, то она по мере роста начнет изгибаться и примет форму спирали. Постоянное наращивание ступеньки новыми слоями приведет к тому, что на грани кристалла образуется спиральная башенка (рис. 20). Центральная часть ее как бы ввинчивается в пространство, опережая в своем движении нижние ступеньки лестницы, ко-

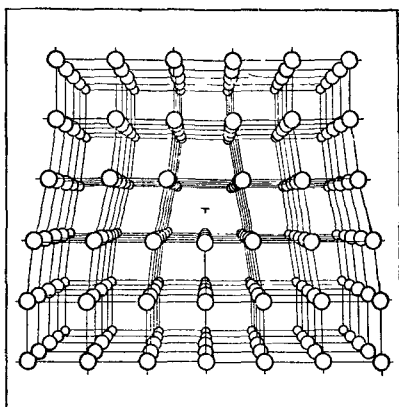


Рис. 19. Расположение атомов в кристалле вблизи краевой дислокации

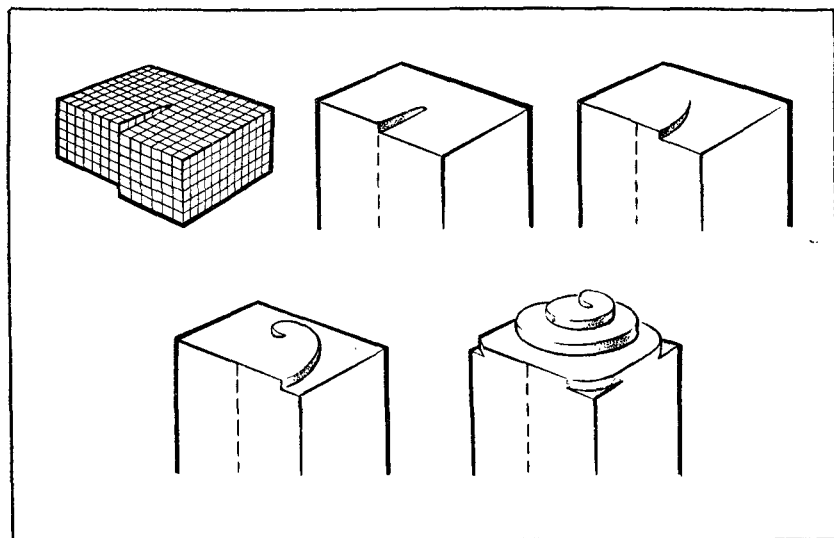


Рис. 20. Схема роста кристалла на винтовой дислокации

торые со временем будут застроены полностью и исчезнут, превратившись в завершённый атомный слой.

Фотографии, полученные с помощью электронного микроскопа, подтвердили реальность спирального механизма роста кристаллов. Если имеется много близко расположенных дислокаций, то ступеньки роста кристаллов имеют высоту во много атомных слоев и их можно видеть даже в обычный микроскоп.

Дендриты. Способы зарождения новых слоев и скорости роста граней кристаллов различных веществ неодинаковы. Одни кристаллы вырастают в виде пластин, другие — в виде иголок. Это вызвано многими причинами. Одна из них — различие молекул вещества по форме. Различие скоростей роста граней кристаллов многих веществ объясняется зависимостью от направления величины сил связи частиц, образующих кристалл. Вероятность прилипания молекул в направлении действия больших сил, конечно, оказывается большей, чем в направлении действия меньших сил. Так обстоит дело в кристаллах с пластинчатой структурой (слюда, графит), в которых рост происходит преимущественно вдоль плоскостей, где действуют сильные связи. В направлениях, перпендикулярных этим плоскостям, скорость роста значительно ниже.

Но не только форма молекул и заметная разница сил их взаимодействия в различных направлениях определяют форму растущего кристалла. Если кристаллы растут при больших пересыщениях пара или раствора, то часто образуются необычные для данного вещества ветвистые, древовидные формы, называемые *д е н д р и т а м и*. Объясняется это тем, что вершины кристаллов соприкасаются с более пересыщенным паром или раствором, чем их грани. опережая в росте боковые грани, вершины внедряются в глубь неиспользованного раствора или пара, что способствует их дальнейшему быстрому росту и т. д.

Примером дендритных образований являются снежинки, ледяные узоры на стекле (фото 6). При медленном росте кристаллы льда принимают обычную для них форму шестигранных призм. Дендриты образуются при быстром охлаждении расплавов солей и металлов. В природе довольно часто встречаются в виде дендритов серебро, медь, золото.

§ 16. ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Монокристаллы ряда элементов и многих химических веществ обладают замечательными механическими, электрическими, магнитными и оптическими свойствами. Так, например, алмаз тверже любого другого минерала, встречающегося на Земле. Кристаллы кварца и слюды обладают рядом электрических свойств, обеспечивающих им широкое применение в технике. Кристаллы флюорита, турмалина, исландского шпата, рубина и многие другие находят применение при изготовлении оптических приборов.

К сожалению, в природе монокристаллы большинства веществ без трещин, загрязнений и других дефектов встречаются редко. Это привело к тому, что многие кристаллы на протяжении тысячелетий люди называют драгоценными камнями. Алмаз, рубин, сапфир, аметист и другие драгоценные камни долгое время ценились людьми очень высоко в основном не за особые механические или другие физические свойства, а лишь из-за своей редкости.

Развитие науки и техники привело к тому, что многие драгоценные камни или просто редко встречающиеся в природе кристаллы стали очень нужными для изготовления деталей приборов и машин, для выполнения научных исследований. Потребность во многих кристаллах возросла настолько, что удовлетворить ее за счет расширения масштабов выработки старых и поисков новых природных месторождений оказалось невозможно.

Кроме того, для многих отраслей техники и особенно для выполнения научных исследований все чаще требуются монокристаллы очень высокой химической чистоты с совершенной кристаллической структурой. Кристаллы, встречающиеся в природе, этим требованиям не удовлетворяют, так как они растут в условиях, весьма далеких от идеальных. Таким образом, возникла задача разработки технологии искусственного изготовления монокристаллов многих элементов и химических соединений.

Разработка сравнительно простого способа изготовления «драгоценного» камня приводит к тому, что он перестает быть драгоценным. Объясняется это тем, что большинство драгоценных камней является кристаллами широко распространенных в природе химических элементов и соединений. Так, алмаз — это кристалл углерода, рубин и сапфир — кристаллы окиси алюминия с различными примесями.

Рассмотрим основные способы выращивания монокристаллов.

Кристаллизация из расплава. На первый взгляд может показаться, что осуществить кристаллизацию из расплава очень просто. Достаточно нагреть вещество выше температуры плавления, получить расплав, а затем охладить его. В принципе это правильный путь, но если не принять специальных мер, то в лучшем случае получится поликристаллический образец. А если опыт проводить, например, с кварцем, серой, селеном, сахаром, способными в зависимости от скорости охлаждения их расплавов затвердевать в кристаллическом или аморфном состоянии, то нет никакой гарантии, что не будет получено аморфное тело.

Для того чтобы вырастить один монокристалл, применяется, например, следующий способ. Тигль с расплавом медленно опускается сквозь отверстие в вертикальной трубчатой печи. Кристалл зарождается на дне тигля, так как оно раньше попадает в область более низких температур, а затем постепенно разрастается по всему объему расплава. Дно тигля специально делают узким, заостренным на конус, чтобы в нем мог расположиться только один кристаллический зародыш (рис. 21).

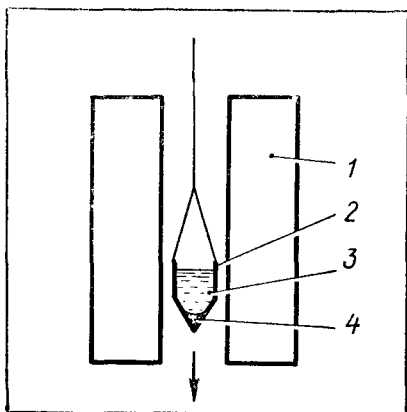


Рис. 21. Схема установки для выращивания кристаллов из расплава методом последовательного охлаждения:

1 — нагреватель; 2 — тигель; 3 — расплав;
4 — растущий кристалл

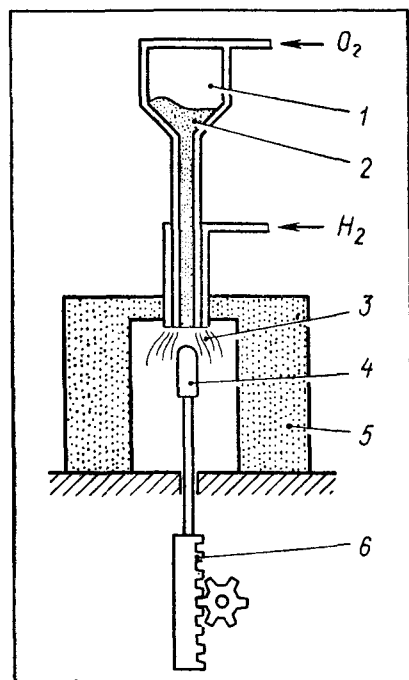


Рис. 22. Схема установки для выращивания кристаллов рубина:

1 — бункер; 2 — порошок; 3 — пламя; 4 — кристалл; 5 — теплоизоляция; 6 — часовой механизм

Этот способ часто применяется для выращивания кристаллов цинка, серебра, алюминия, меди и других металлов, а также хлористого натрия, бромистого калия, фтористого лития и других солей, используемых оптической промышленностью. За сутки можно вырастить кристалл каменной соли массой порядка килограмма.

Недостатком описанного метода является загрязнение кристаллов материалом тигля.

Этого недостатка лишен бестигельный способ выращивания кристаллов из расплава, которым выращивают, например, корунд, рубины, сапфиры. Тончайший порошок окиси алюминия из зерен размером 2—100 мкм высыпается тонкой струей из бункера, проходит через кислородно-водородное пламя, плавится и в виде капли попадает на стержень из тугоплавкого материала. Температура стержня поддерживается несколько ниже температуры плавления окиси алюминия (2030 °С). Капли окиси алюминия охлаждаются на нем и образуют корку спекшейся массы корунда. Часовой механизм медленно (10—20 мм/ч) опускает стержень, и на нем постепенно вырастает неограниченный кристалл корунда (рис. 22).

Кристаллизация из раствора. Получение кристаллов из раствора сводится к двум способам. Первый из них состоит в медленном испарении растворителя из насыщенного раствора, а второй — в медленном понижении температуры раствора. Чаще применяют второй способ. В качестве растворителей ис-

пользуют воду, спирты, кислоты, расплавленные соли и металлы. Недостатком методов выращивания кристаллов из раствора является возможность загрязнения кристаллов частицами растворителя.

Кристалл растет из тех участков пересыщенного раствора, которые его непосредственно окружают. В результате этого вблизи кристалла раствор оказывается менее пересыщенным, чем вдали от него. Так как пересыщенный раствор тяжелее насыщенного, то над поверхностью растущего кристалла всегда имеется направленный вверх поток «использованного» раствора. Без такого перемещения раствора рост кристаллов быстро бы прекратился. Поэтому часто дополнительно перемешивают раствор или закрепляют кристалл на вращающемся держателе. Это позволяет выращивать более совершенные кристаллы.

Чем меньше скорость роста, тем лучшие получаются кристаллы. Это правило справедливо для всех методов выращивания. Кристаллы сахара и поваренной соли легко получить из водного раствора в домашних условиях. Но, к сожалению, не все кристаллы можно вырастить так просто. Например, получение кристаллов кварца из раствора происходит при температуре 400 °С и давлении 10⁸ Па.

§ 17. ПРИМЕНЕНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Применения монокристаллов. Применения кристаллов в науке и технике так многочисленны и разнообразны, что их трудно перечислить. Поэтому ограничимся несколькими примерами.

Самый твердый и самый редкий из природных минералов — алмаз. За всю историю человечества его добыто всего около 150 т, хотя в мировой алмазодобывающей промышленности сейчас работает почти миллион человек. Сегодня алмаз в первую очередь камень-работник, а не камень-украшение.

Около 80% всех добываемых природных алмазов и все искусственные алмазы используются в промышленности. Роль алмазов в современной технике так велика, что, по подсчетам американских экономистов, прекращение применения алмазов привело бы к уменьшению мощности промышленности США вдвое.

Примерно 80% применяемых в технике алмазов идет на заточку инструментов и резов из сверхтвердых сплавов. Алмазы служат опорными камнями (подшипниками) в хронометрах высшего класса для морских судов и в других особо точных навигационных приборах. На алмазных подшипниках не обнаруживается никаких следов износа даже после 25 000 000 оборотов.

Несколько уступая алмазу по твердости, соревнуется с ним по разнообразию технических применений рубин — благородный корунд, окись алюминия Al_2O_3 с красящей примесью окиси хрома. Мировое производство искусственных рубинов превышает 100 т в год. Из 1 кг синтетического рубина удается изготовить около 40 000 опорных камней для часов. Незаменимыми оказались

рубиновые стержни на фабриках по изготовлению химического волокна. На изготовление 1 м ткани из искусственного волокна требуется израсходовать сотни тысяч метров волокна. Нитеводители из самого твердого стекла при протяжке через них искусственного волокна изнашиваются за несколько дней, агатовые способны работать до двух месяцев, рубиновые нитеводители оказываются практически вечными.

Новая область для широкого применения рубинов в научных исследованиях и в технике открылась с изобретением рубинового лазера — прибора, в котором рубиновый стержень служит мощным источником света, испускаемого в виде тонкого светового луча.

Исключительная роль выпала на долю кристаллов в современной электронике. Большинство полупроводниковых электронных приборов изготовлено из кристаллов германия или кремния.

Способы повышения прочности твердых тел. Повышение пределов прочности таких широко используемых в технике материалов, как сталь, чугун, алюминий, медь и многих других, является задачей исключительной важности.

Сравнение реальной прочности кристаллов со значениями, полученными на основании теоретических расчетов, обнаруживает весьма существенные расхождения: теоретический предел прочности в десятки и даже в сотни раз превосходит значения, получаемые при испытаниях реальных образцов! Это означает, что на изготовление станков и машин, железных дорог и трубопроводов расходуются в десятки и сотни раз большее количество материалов, чем это было

бы необходимо при получении материалов, обладающих такой прочностью, какая предсказана теорией. Поэтому физикам и инженерам очень важно было узнать, по какой причине реальная прочность твердых тел оказывается значительно меньше величин, рассчитанных для идеальной модели. Оказалось, что причина расхождения теории и эксперимента — наличие внутренних и поверхностных дефектов, существование которых не учитывалось в расчетах.

В 1924 г. академик А. Ф. Иоффе показал, что прочность кристаллов каменной соли на разрыв увеличивается в 400 раз, если измерения проводить с кристаллами, погружен-



А. Ф. Иоффе

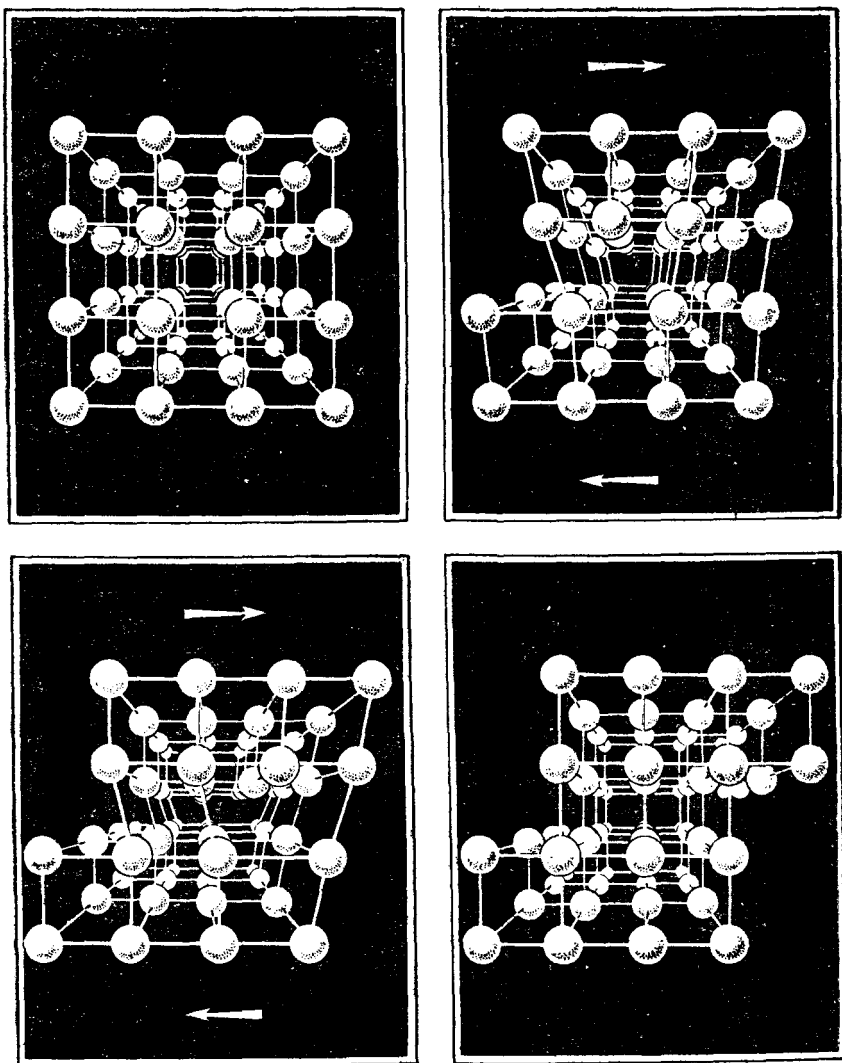


Рис. 23. Схема движения дислокации в кристалле

ными в раствор каменной соли. Из-за процессов растворения и кристаллизации различного рода дефекты поверхности кристалла — трещины, дислокации — исчезают, поэтому прочность его возрастает почти до теоретического значения $150 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.

Внутренние дефекты также влияют на механические свойства твердых тел. При наличии дислокаций для осуществления пластической деформации нет необходимости в одновременном разрыве

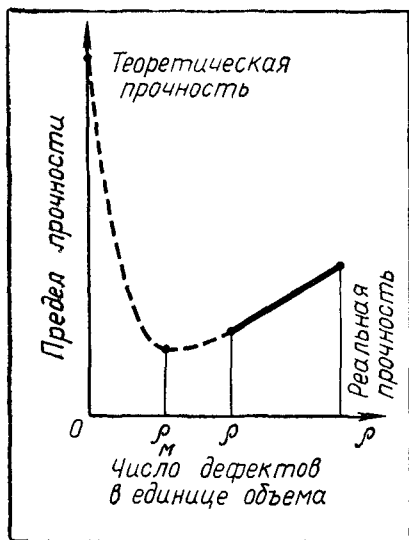


Рис. 24. Зависимость прочности от числа дефектов в единице объема кристалла

тившаяся на ее пути. Поэтому при увеличении числа дислокаций в единице объема прочность кристалла сначала уменьшается, а затем начинает возрастать. Это обстоятельство иллюстрируется на графике зависимости предела прочности от числа дефектов в единице объема кристалла (рис. 24).

Полученные в лабораторных условиях методом выращивания из паров бездислокационные кристаллы в виде тонких нитей толщиной порядка микрометра, как видно из таблицы 1, имеют прочность, близкую к теоретической. Нитевидные кристаллы сапфира (фото 9) являются рекордсменами прочности.

Таблица 1

Теоретическое значение прочности некоторых материалов и прочность их монокристаллов в виде «усов»

Материал	Оксид алюминия (сапфир)	Железо	Медь
Теоретическая прочность, Н/м ²	$3 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$
Прочность «усов», Н/м ²	$2,8 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$0,4 \cdot 10^{10}$

Способ повышения прочности твердых тел путем получения кристаллов с очень малым количеством дислокаций пока еще не используется в промышленности. Большинство современных методов упрочнения материалов основано на противоположном спо-

всех связей между двумя плоскостями. Достаточно разорвать небольшое число связей и переместить дислокацию на расстояние порядка постоянной решетки, как это показано на рисунке 23. Таким образом, дислокации позволяют осуществлять поочередный разрыв небольшого числа связей и этим облегчают пластическую деформацию.

Для получения материалов с высокой прочностью на разрыв и сдвиг, т. е. с большим сопротивлением пластической деформации, необходимо либо уменьшить в них число дислокаций, либо создать условия, затрудняющие перемещение дислокаций. Препятствием перемещению дислокации может служить другая дислокация, встре-

собе, состоящем в искажении кристаллической структуры путем создания в ней различного рода дефектов — введением примесей, созданием дислокаций. Например, при легировании стали — введении в расплав небольших добавок хрома, вольфрама и других элементов — ее прочность увеличивается примерно втрое.

При протяжке, дробеструйной обработке металлов и т. п. происходит так называемый наклеп, приводящий к увеличению плотности дислокаций и повышению прочности. Например, после протяжки бруска углеродистой стали предел прочности возрастает вдвое.

Обработка металлов давлением приводит к уменьшению размеров кристаллов и увеличению дефектов структуры внутри самих зерен. И то и другое мешает передвижению дислокаций и приводит к значительному повышению прочности.

§ 18. КРИСТАЛЛЫ И ЖИЗНЬ

Кристаллы возникают и как продукты жизнедеятельности организмов. В морской воде растворены различные соли. Многие морские животные строят свои раковины и скелеты из кристаллов углекислого кальция — а р а г о н и т а (см. форзац в конце книги).

Кристалл обычно служит символом неживой природы. Однако грань между живым и неживым установить очень трудно, и понятия «кристалл» и «жизнь» не являются взаимоисключающими. Простейшие живые организмы — в и р у с ы — могут соединяться в кристаллы. Конечно, в кристаллическом состоянии они не обнаруживают никаких признаков живого, так как сложные жизненные процессы в кристаллах протекать не могут. Но при изменениях внешних условий на благоприятные (такими для вирусов являются условия внутри клеток живого организма) они начинают двигаться, размножаться (фото 7—8).

Кристалл и живой организм представляют собой примеры осуществления крайних возможностей в природе. В кристалле неизменными остаются не только сами атомы и молекулы, но также их взаимное расположение в пространстве. В живом организме не только не существует сколько-нибудь постоянной структуры в расположении атомов и молекул, но ни на одно мгновение не остается неизменным его химический состав. В процессе жизнедеятельности организма одни химические соединения разлагаются на более простые, другие сложные соединения синтезируются из простых.

Но при всех химических процессах, протекающих в живом организме, этот организм остается самим собой в течение десятков лет! Более того, потомки каждого живого организма являются удивительно близкой его копией! Следовательно, в клетках любого животного или растения имеется что-то постоянное, неизменное, способное управлять химическими процессами, протекающими в них. Такими носителями «программы» процессов, протекающих в живой клетке, оказались молекулы д е з о к с и р и б о н у к л е-

и новой кислоты, называемой коротко ДНК. В клетках человеческого организма одна такая молекула имеет длину несколько сантиметров! Имея очень малую толщину, такие молекулы укладываются внутри клеток, видимых лишь в микроскоп.

Молекулы ДНК не только управляют процессами жизнедеятельности клетки, но и несут в себе полную информацию о строении и развитии всего живого организма из одной только клетки! С полным основанием можно сказать, что молекула ДНК является основой жизни.

Согласно современным данным, молекула ДНК представляет собой двойную спираль, составленную из небольшого числа сравнительно простых молекулярных соединений, повторяющихся в строго определенном для данного вида порядке. Диаметр молекулы ДНК равен $2 \cdot 10^{-9}$ м, а длина может достигать нескольких сантиметров. Такие гигантские молекулы с точки зрения физики рассматриваются как особый вид твердого тела — **о д н о м е р н ы е а п е р и о д и ч е с к и е к р и с т а л л ы**. Следовательно, кристаллы — это не только символ неживой природы, но и основа жизни на Земле.

§ 19. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД

Границы применимости молекулярно-кинетической теории. Успешное применение молекулярно-кинетической теории для объяснения основных свойств газов, жидкостей и твердых тел делает заманчивой попытку количественного описания всех явлений в молекулярной физике лишь на основе применения молекулярно-кинетической теории. Однако этот путь в большинстве случаев оказывается либо слишком сложным, либо принципиально неприменимым.

Попробуем, например, решить следующую задачу, используя лишь молекулярно-кинетическую теорию и законы механики.

В цилиндре под поршнем, способным перемещаться, находится идеальный газ. Объем газа V_1 , его давление p_1 , температура T_1 . Какими будут давление p_2 и температура T_2 газа, если тело массой m , упавшее на поршень с высоты h , вызвало уменьшение объема газа до V_2 (рис. 25)?

Поскольку в условии задачи не упоминается о нагревании, кажется очевидным, что температура тела при любых изменениях объема и давления должна оставаться неизменной, т. е. $T_1 = T_2$. Изменение давления газа при изотермическом процессе должно быть обратно пропорциональным изменению его объема:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \quad p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2}.$$

Казалось бы, задача решена. Однако сделаем следующий опыт. В прозрачный цилиндр из плексигласа поместим кусочек ваты, затем вставим поршень, снабженный штоком с большой рукояткой. Установим цилиндр с поршнем на столе вертикально, заменим удар тела массой m резким ударом ладони по рукоятке (рис. 26). Опыт показывает, что при быстром сжатии воздуха в цилиндре вата вспыхивает, т. е. температура воздуха в цилиндре существенно повышается, хотя теплопередача не происходит.

В результате чего же произошло изменение температуры воздуха в цилиндре и каким способом можно рассчитать это изменение?

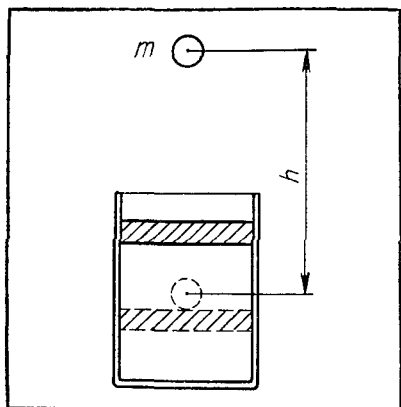


Рис. 25. Сжатие газа в цилиндре

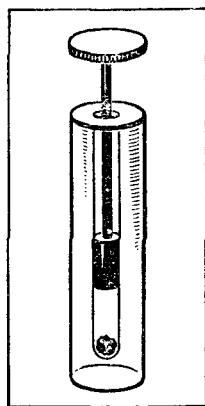


Рис. 26. «Воздушное огниво»

Можно предположить, что возрастание температуры газа при сжатии происходит в результате столкновений молекул с движущимся поршнем. Это предположение кажется мало правдоподобным, так как скорости теплового движения молекул воздуха при комнатной температуре имеют значения около 500 м/с, а скорость движения поршня не превышает нескольких метров в секунду. Однако приблизительный расчет показывает (§ 31, задача 23) возможность такого результата. Но можно ли считать полученный таким образом результат точным? Конечно, нет. В расчетах длины пути, пройденного молекулой, и числа ее столкновений с поршнем трудно учесть хаотический характер теплового движения молекул и изменение скорости их движения в результате взаимных столкновений. Не учитывалось в расчетах и отличие свойств реального газа от идеального.

Таким образом, молекулярно-кинетическая теория сталкивается с серьезными трудностями при попытке перейти от приблизительных качественных объяснений к точным количественным расчетам. Эти трудности связаны, с одной стороны, с неполнотой наших знаний о силах взаимодействия молекул, с другой стороны, они обусловлены чрезвычайно большим числом взаимодействующих между собой тел.

Термодинамика. Для анализа большого круга физических явлений и процессов, решения практических задач более продуктивным оказывается применение методов термодинамики.

Термодинамика изучает общие свойства тел и различные процессы в них, сопровождающиеся превращениями энергии, не используя какую-либо определенную модель строения вещества и не высказывая предположения о законах взаимодействия атомов и молекул. В основу ее положено небольшое число наиболее общих законов природы. Широкие возможности применения методов

термодинамики связаны с тем, что многие свойства тел обусловлены происходящими в них процессами превращения энергии из одних видов в другие. Сформулированный на основе обобщения всех известных в настоящее время в физике опытных данных закон сохранения и превращения энергии является одним из основных постулатов термодинамики.

Термодинамическая система. В термодинамике часто используется предположение о возможности выделения совокупности тел, не взаимодействующих с другими телами.

Совокупность физических тел, изолированная от взаимодействия с другими телами, называется изолированной термодинамической системой.

Состояние термодинамической системы полностью описывается некоторым числом независимых физических параметров. Например, состояние некоторой массы газа характеризуется объемом V , давлением p и температурой T .

Различают равновесные и неравновесные состояния системы. *Равновесным называется такое состояние термодинамической системы, при котором все ее параметры остаются с течением времени неизменными без необходимости совершения какого-либо термодинамического процесса вне этой системы.*

Любое изменение в термодинамической системе, сопровождающееся изменением хотя бы одного параметра системы, называется термодинамическим процессом. Изучение термодинамических процессов является одной из задач термодинамики.

Внутренняя энергия. Одним из важнейших параметров термодинамической системы является внутренняя энергия системы. *Внутренней энергией системы называют совокупность всех видов энергии, которыми обладают тела, входящие в систему.*

На основании результатов всех выполненных до сих пор опытов и наблюдений в термодинамике принимается закон сохранения и превращения энергии. Его можно сформулировать как закон постоянства внутренней энергии: **при любых процессах в изолированной термодинамической системе внутренняя энергия остается неизменной:**

$$U = \text{const}, \text{ или } \Delta U = 0.$$

Этот факт имеет принципиальное значение. Из него следует, что *движение материи имеет меру, одинаково пригодную для количественной характеристики движения любой формы материи. Этой мерой движения является энергия.*

Решение задачи. Возвращаясь к задаче, поставленной в начале параграфа, используем для ее решения термодинамический метод. Рассматривая Землю, тело массой m и газ в цилиндре с поршнем как изолированную термодинамическую систему, можно утверждать, что внутренняя энергия системы в результате падения тела с высоты h и сжатия газа в цилиндре остается неизменной. Однако при этом потенциальная энергия системы Земля — тело

уменьшилась на величину $\Delta E = mgh$, следовательно, внутренняя энергия газа в цилиндре должна увеличиться на равную величину:

$$\Delta U = \Delta E = mgh.$$

Это утверждение справедливо, если к моменту достижения значения объема газа V_2 скорость тела массой m равна нулю и потерями энергии на нагревание стенок цилиндра и поршня можно пренебречь.

Считая газ в цилиндре идеальным, изменение его внутренней энергии ΔU можно связать с изменением температуры ΔT :

$$\Delta U = N \cdot \Delta E = N \frac{3}{2} k \cdot \Delta T = mgh,$$

откуда

$$\Delta T = \frac{2mgh}{3kN},$$

где k — постоянная Больцмана, N — число молекул в цилиндре.

Определив температуру $T_2 = T_1 + \Delta T$ и зная объем газа V_2 , можно определить его давление p_2 из уравнения состояния идеального газа.

Таким образом, задача решена полностью. Однако при ее решении использовались и термодинамический метод, и элементы молекулярно-кинетической теории. Молекулярно-кинетическая теория оказалась необходимой для установления связи между изменениями внутренней энергии газа ΔU и его температуры ΔT .

Покажем, что в термодинамике можно установить связь между внутренней энергией тела и его температурой и без использования молекулярно-кинетической теории.

§ 20. РАБОТА И КОЛИЧЕСТВО ТЕПЛОТЫ В ТЕРМОДИНАМИКЕ

Два способа изменения внутренней энергии — совершение механической работы и теплопередача. Внутренняя энергия изолированной системы может изменяться двумя способами — совершением механической работы над системой или теплопередачей от других тел. *Мерой передачи энергии или ее превращения из одной формы в другую в механических процессах служит работа A . Количество энергии, переданное путем теплопередачи, называют количеством теплоты Q .* Способ передачи энергии путем совершения работы является макроскопическим, а теплопередача — микроскопический способ передачи энергии.

Первое начало термодинамики. Если тело A испытывает механическое воздействие со стороны тела B и одновременно участвует в теплообмене с телом C , то изменение его внутренней энергии ΔU_A можно определить, рассмотрев изолированную термодинамическую систему из тел A , B и C . На основании закона сохранения

и превращения энергии можно утверждать, что внутренняя энергия системы из тел A , B и C остается неизменной:

$$\Delta U = \Delta U_A + \Delta U_B + \Delta U_C = 0.$$

Следовательно, изменение внутренней энергии тела A равно по модулю и противоположно по знаку сумме изменений внутренней энергии тел B и C , с которыми осуществляется взаимодействие:

$$\Delta U_A = -(\Delta U_B + \Delta U_C).$$

При совершении работы над системой или осуществлении теплопередачи энергия не возникает и не исчезает, а лишь переходит от одного тела к другому, при этом происходит превращение одной формы движения материи в другую в равной количественной мере.

Изменение внутренней энергии $\Delta U = \Delta U_A$ неизолированной термодинамической системы можно определить, измерив работу внешних сил $A = -\Delta U_B$, совершенную над системой, и количество переданной ей теплоты $Q = -\Delta U_C$:

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

Эта форма выражения закона сохранения и превращения энергии называется первым законом термодинамики. Его можно сформулировать следующим образом: изменение внутренней энергии системы при переходе из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества переданной теплоты.

Количество теплоты и удельная теплоемкость. Способ определения изменения энергии тела путем измерения совершенной над ним работы был изучен в механике.

В термодинамике для вычисления изменения внутренней энергии тела в результате теплопередачи необходимо найти способ измерения количества теплоты Q , полученного телом.

Определение количества теплоты основано на измерении температуры. Если работа внешних сил равна нулю ($A = 0$) и изменение внутренней энергии тела происходит только в результате теплопередачи, то согласно первому закону термодинамики $\Delta U = Q$.

Внутренняя энергия идеального газа равна сумме значений кинетической энергии всех молекул и, следовательно, пропорциональна абсолютной температуре газа T и числу его молекул N :

$$U = N\bar{\epsilon} = N \frac{3}{2} kT.$$

Можно предположить, что внутренняя энергия любого тела прямо пропорциональна его абсолютной температуре и числу содержащихся в нем молекул. Тогда изменение внутренней энергии тела в результате передачи ему количества теплоты можно выразить следующим образом:

$$\Delta U = Q = cm \cdot \Delta T,$$

где ΔT — изменение температуры тела, m — масса тела как макроскопическая величина, пропорциональная числу молекул в нем N ,

c — постоянная, называемая удельной теплоемкостью вещества, зависящая от свойств молекул данного вещества и его агрегатного состояния.

Из этого выражения следует, что *удельная теплоемкость c вещества при условии $A = 0$ численно равна изменению внутренней энергии единицы массы вещества при изменении его температуры на 1 К:*

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \cdot \Delta T}.$$

Ее размерность — $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$.

Уравнение теплового баланса. Если известна удельная теплоемкость c_1 одного вещества, то удельную теплоемкость c_2 любого другого вещества легко определить, приведя в тепловой контакт два тела с известными массами и различными начальными температурами в условиях теплоизоляции.

В результате осуществления теплопередачи от горячего тела к холодному в системе устанавливается тепловое равновесие. Согласно закону сохранения энергии в изолированной системе изменение внутренней энергии одного тела в точности равно по модулю и противоположно по знаку изменению внутренней энергии второго тела ΔU_2 , т. е.

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = 0.$$

Если изменение внутренней энергии системы происходило только путем теплопередачи, то на основании первого начала термодинамики можно записать: $\Delta U_1 = Q_1$, $\Delta U_2 = Q_2$ и $Q_1 + Q_2 = 0$, или

$$c_1 m_1 \cdot \Delta T_1 + c_2 m_2 \Delta T_2 = 0.$$

Из этого выражения, называемого уравнением теплового баланса, можно определить удельную теплоемкость вещества c_2 :

$$c_2 = - \frac{c_1 m_1 \cdot \Delta T_1}{m_2 \cdot \Delta T_2}.$$

Таким образом, зная удельную теплоемкость c_1 одного вещества, можно термодинамическим методом определить удельную теплоемкость любого другого вещества. Но как определить удельную теплоемкость c_1 выбранного нами эталонного вещества?

Механический эквивалент теплоты. Удельную теплоемкость c эталонного вещества можно определить, если на тело известной массы m произвести механическое воздействие, приводящее к нагреванию, и измерить изменение температуры тела ΔT . При механическом воздействии на тело без теплообмена с другими телами, т. е. при условии $Q = 0$, согласно первому началу термодинамики изменение внутренней энергии тела ΔU оказывается равным работе внешних сил A :

$$\Delta U = A.$$

Такое же изменение внутренней энергии ΔU тела можно про-
извести нагреванием на ΔT путем теплопередачи $\Delta U = Q = c_1 m \times$
 $\times \Delta T$. Отсюда для определения удельной теплоемкости c_1 получаем
выражение: $c_1 = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{A}{m \cdot \Delta T}$.

Следовательно, для определения удельной теплоемкости c_1
вещества нужно измерить работу A , совершенную внешними сила-
ми, действующими на тело, и измерить наблюдаемое в результате
совершения работы изменение температуры тела в условиях от-
сутствия теплообмена его с другими телами. Такого рода экспери-
менты были впервые выполнены в 1843 г. Джемсом Джоу-
лем. В этих опытах было определено соотношение между единицей
измерения количества теплоты и единицей измерения работы, т. е.
найден механический эквивалент теплоты.

§ 21. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

Количество теплоты Q , передаваемое телу при теплопередаче,
не определяет однозначно температуру тела T , так как внутренняя
энергия тела может изменяться и за счет совершения над ним ра-
боты A . Поэтому в отличие от такой, например, неизменной характе-
ристики вещества, как его молярная масса M , удельная теплоемкость
зависит от условий, при которых происходит передача тепла.

Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме. Рас-
смотрим случай передачи тепла идеальному газу при условии не-
изменности занимаемого им объема.

Условие передачи тепла газу при постоянном объеме выбрано
нами не случайно. Работа, совершаемая внешними силами над га-
зом, при постоянном объеме равна нулю: $A = 0$. Из первого закона
термодинамики $\Delta U = Q + A$ следует, что в этом случае количе-
ство переданного газу тепла равно изменению его внутренней
энергии: $Q = \Delta U$. Поэтому удельную теплоемкость газа при по-
стоянном объеме можно найти, вычислив изменение внутренней энер-
гии единицы массы газа при изменении его температуры на 1 К:

$$c_v = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \cdot \Delta T}.$$

Внутренняя энергия идеального газа является кинетической
энергией теплового движения молекул и может быть найдена как
произведение средней кинетической энергии теплового движения
молекулы \bar{E} на число молекул N :

$$U = \bar{E}N = \frac{3}{2}kTN.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа при увеличении
его температуры на величину ΔT определится выражением:

$$\Delta U = \frac{3}{2}k \cdot \Delta T \cdot N.$$

Отсюда получаем:

$$c_V = \frac{\frac{3}{2} k \cdot \Delta T \cdot N}{m \cdot \Delta T} = \frac{3}{2} k \frac{N}{m} = \frac{3}{2} \frac{k N_A n}{m M} = \frac{3}{2} \frac{R}{M},$$

где M — молярная масса газа.

Для того чтобы проверить справедливость полученного вывода, вычислим удельные теплоемкости при постоянном объеме для некоторых газов и сравним их со значениями теплоемкости, полученными экспериментально. Результаты вычислений для водорода, гелия, азота, аргона и углекислого газа приведены в первой строке таблицы 2. Во второй строке этой таблицы приведены значения удельной теплоемкости тех же газов, полученные экспериментально.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений удельной теплоемкости газов при постоянном объеме показывает замечательное их согласие для гелия и аргона. Теплоемкости водорода, азота и углекислого газа оказываются в действительности значительно большими, чем предсказывает теория, основанная на использовании модели идеального газа.

Таблица 2

Удельная теплоемкость газов при постоянном объеме

Формула и наименование	Водород	Гелий	Азот	Аргон	Углекислый газ
$c_V = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$ Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	6,2 · 10 ³	3,1 · 10 ³	4,45 · 10 ²	3,1 · 10 ²	2,8 · 10 ²
c_V (экс.), Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	10 ⁴	3,1 · 10 ³	7,5 · 10 ²	3,1 · 10 ²	6,3 · 10 ²
$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M}$ Дж · кг ⁻¹ · К ⁻¹	10 ⁴	3,1 · 10 ³	7,4 · 10 ²	3,1 · 10 ²	5,7 · 10 ²

Чем же отличаются гелий и аргон от остальных газов? Существенным их отличием от водорода, азота и углекислого газа является то, что это инертные газы. Силы взаимодействия между атомами инертных газов настолько малы, что они при нормальных условиях не соединяются в молекулы. Гелий и аргон — атомные газы; водород, азот и углекислый газ — молекулярные газы.

Следовательно, расчеты удельной теплоемкости газов, выполненные в предположении, что их свойства близки к свойствам идеального газа, оказываются справедливыми для одноатомных газов и непригодными для описания свойств молекулярных газов.

Так как теплоемкость молекулярных газов в действительности оказывается большей, чем теплоемкость идеального газа, а все

тепло, передаваемое газу в условиях неизменности занимаемого им объема, идет на увеличение внутренней энергии, необходимо признать, что внутренняя энергия молекулярного газа не определяется точно выражением:

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

Распределение энергии по степеням свободы. Сделаем попытку уточнения теории. До сих пор при рассмотрении свойств атомов или молекул газа предполагалось, что их размеры очень малы. Поэтому в расчетах учитывалась лишь кинетическая энергия поступательного движения, а кинетическая энергия вращательного движения считалась пренебрежимо малой. Согласие расчетов с экспериментом при вычислении теплоемкости одноатомных газов показывает, что для них такое предположение оказывается справедливым. Поскольку теплоемкости многоатомных газов оказываются большими, чем следует из расчетов при учете только кинетической энергии поступательного движения молекул, можно предположить, что внутренняя энергия молекулярных газов складывается из кинетической энергии поступательного движения молекул и кинетической энергии их вращательного движения.

Такое предположение правдоподобно, но если только им и ограничиться, то уточнить результаты расчетов не удастся, так как остается неизвестным, какова величина кинетической энергии вращения молекул.

Решение этой проблемы оказывается довольно простым. Пространство, в котором происходит поступательное движение молекул, имеет три измерения. В прямоугольной системе координат эти три измерения задаются тремя координатами положения молекулы и тремя проекциями вектора скорости \vec{v} на эти координатные оси: v_x, v_y, v_z . Если вероятность движения тела в любом из трех возможных направлений в пространстве одинакова, то говорят, что оно обладает тремя степенями свободы.

Так как движение молекул газа совершенно хаотично, квадраты проекций скорости на каждую из координатных осей в среднем оказываются одинаковыми:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2.$$

Отсюда следует, что кинетическая энергия поступательного движения, приходящаяся на каждую из трех степеней свободы движения, в среднем одинакова. Так как средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы \bar{E}_k равна: $\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT$, кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы движения, равна $1/2 kT$.

Теплоемкость многоатомных газов. Двухатомная молекула, кроме трех степеней свободы поступательного движения, обладает еще и двумя степенями свободы вращательного движения, так как

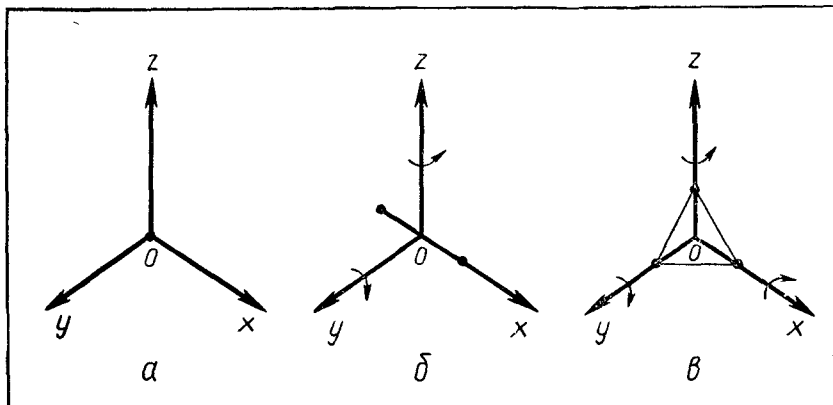


Рис. 27. Модели молекул: а — одноатомной; б — двухатомной; в — трехатомной

может совершать вращение вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. Предполагая, что кинетическая энергия молекулы распределяется между всеми возможными видами ее движения поровну, мы получим, что кинетическая энергия молекулы равна:

$$\bar{E}_k = \bar{E}_{\text{пост}} + \bar{E}_{\text{вр}} = 3 \cdot \frac{1}{2} kT + 2 \cdot \frac{1}{2} kT = \frac{5}{2} kT.$$

Вращением двухатомной молекулы вокруг третьей оси, проходящей через центры атомов, можно пренебречь, так как предположение об отсутствии вращения атомов вокруг своих осей подтверждалось в случае вычисления теплоемкостей одноатомных газов.

Молекулы, состоящие более чем из двух атомов, обладают тремя степенями свободы вращательного движения и тремя степенями свободы поступательного движения (рис. 27).

Для газа, молекулы которого обладают числом степеней свободы i , получаем следующее выражение для удельной теплоемкости при постоянном объеме:

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}.$$

Используя это выражение, вычислим удельные теплоемкости двухатомных газов — водорода и азота и трехатомного углекислого газа. Результаты вычислений приведены в третьей строке таблицы 2.

Хорошее согласие теоретических и экспериментальных значений теплоемкости многоатомных газов доказывает справедливость сделанного при выполнении расчетов предположения о равном распределении энергии по степеням свободы движения. Такое распределение энергии по степеням свободы строго доказывается в молекулярно-кинетической теории и называется законом равнораспределения.

Теплоемкость газа при постоянном давлении. До сих пор мы искали способы определения теплоемкости газа при постоянном объеме. Интересным в практике является также случай передачи тепла газу, находящемуся при постоянном давлении. Используя первый закон термодинамики, количество тепла Q , переданного газу, можно выразить через изменение внутренней энергии ΔU газа и работу A , совершенную над газом при нагревании:

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

Вместо работы A , произведенной внешними силами, можно пользоваться в расчетах равной по модулю и противоположной по знаку работой A' , совершенной газом:

$$A' = -A.$$

Тогда для удельной теплоемкости c_p газа при постоянном давлении получим выражение:

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta U + A'}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \cdot \Delta T} + \frac{A'}{m \cdot \Delta T}.$$

Первое слагаемое в этом выражении — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме c_v , второе слагаемое имеет физический смысл работы, совершаемой единицей массы газа при нагревании на 1 К при постоянном давлении:

$$c_p = c_v + \frac{A'}{m \cdot \Delta T}.$$

§ 22. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ЖИДКОСТЕЙ

Теплоемкость твердых тел. Пренебрегая работой, которая совершается при расширении твердого тела в результате нагревания, можно считать, что количество теплоты Q , переданное твердому телу при нагревании его на ΔT , одинаково при постоянном объеме и при постоянном давлении. Оно равно изменению внутренней энергии твердого тела ΔU :

$$Q = \Delta U.$$

Тепловое движение частиц, из которых состоят кристаллы, в основном сводится к колебаниям около положений равновесия. В твердом теле в отличие от газов велика потенциальная энергия взаимодействия атомов и молекул. Считая, что средние значения кинетической и потенциальной энергии частицы в твердом теле одинаковы, мы получим, что на одну колебательную степень свободы приходится энергия, в 2 раза большая, чем на одну степень свободы поступательного движения, т. е. $2 (1/2 kT) = kT$. Полная энергия колебательного движения одной молекулы равна $3 kT$.

Отсюда изменение внутренней энергии твердого тела при изменении его температуры на величину ΔT равно:

$$\Delta U = 3k \cdot \Delta T \cdot N,$$

а удельная теплоемкость вещества в твердом состоянии равна:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \cdot \Delta T} = \frac{3k \cdot \Delta T \cdot N}{m \cdot \Delta T} = \frac{3kN}{m}.$$

Теплоемкость одного моля любого вещества в твердом состоянии равна:

$$C = cM = \frac{3kN_A M}{M} = 3R.$$

Этот вывод, сделанный на основе предположения о справедливости для твердых тел закона равномерного распределения энергии по степеням свободы, находится в сравнительно хорошем согласии с результатами, полученными экспериментально для многих веществ в твердом состоянии. Приблизительное равенство молярных теплоемкостей различных элементов в твердом состоянии было установлено на основании опытов в 1819 г. французскими физиками Дюлонгом и Пти.

Тепловое движение молекул в жидкости, как и в твердом теле, в основном сводится к колебаниям около временных положений равновесия. Поэтому теплоемкость вещества в жидком состоянии обычно мало отличается от его теплоемкости в твердом состоянии.

Недостатки классической теории теплоемкости. Экспериментальные данные о теплоемкости твердых тел показывают, что при сравнительно хорошем согласии результатов классической теории теплоемкости твердых тел с экспериментальными данными, полученными для таких, например, веществ, как алюминий, железо, золото, медь и ряд других, встречаются примеры резкого расхождения теории с экспериментом. Так, атомные теплоемкости бора и углерода в твердом состоянии значительно отличаются от значений, предсказываемых классической теорией.

Было у классической теории теплоемкости и еще одно затруднение. Твердые тела по их электрическим свойствам делятся на металлы и диэлектрики. В диэлектриках нет свободных электронов. Согласно закону равномерного распределения энергии внутренняя энергия металлического твердого тела должна складываться из энергии тепловых колебаний атомов кристаллической решетки и энергии теплового движения свободных электронов. Отсюда теплоемкость 1 моль металла должна быть больше теплоемкости 1 моль диэлектрика на величину теплоемкости электронного газа. В действительности теплоемкость 1 моль металла не отличается от теплоемкости диэлектриков и равна $3R$.

Из всего сказанного следует, что рассмотренная нами классическая теория теплоемкости твердых тел является очень грубым при-

ближением к действительности. Основные особенности поведения твердых тел в процессах теплопередачи объясняет квантовая теория теплоемкости.

§ 23. ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Использование тепловых машин для совершения работы за счет теплоты, освобождающейся при сжигании угля, нефти и газа, лежит в основе современной энергетики, так как примерно из $2,5 \cdot 10^{20}$ Дж энергии, потребляемой в настоящее время всем человечеством в год, более 90% получается за счет сжигания различных видов химического горючего. Количество энергии, потребляемой на душу населения, является одним из важнейших показателей экономического и технического развития общества. Среднее потребление энергии на одного жителя Земли составляет примерно 170 млн. Дж в сутки, а в Советском Союзе производится в среднем на одного человека около 500 млн. Дж в сутки.

Много это или мало — 500 млн. Дж? Для сравнения вычислим кинетическую энергию искусственного спутника Земли массой 10 кг, движущегося со скоростью 8 км/с:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{10 \text{ кг} \cdot 64 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-2}}{2} = 320 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Энергия, потребляемая в среднем одним человеком в Советском Союзе за сутки, при использовании без потерь достаточна для запуска на орбиту вокруг Земли искусственного спутника массой 10 кг, а энергия, потребляемая за неделю, достаточна для сообщения первой космической скорости и самому человеку!

Можно произвести оценку средней энерговооруженности человека и по-другому. Суточное потребление энергии из пищи в процессе обмена веществ в организме человека лежит в пределах 10^7 — $2 \cdot 10^7$ Дж. Далеко не вся потребляемая энергия может быть использована человеком для совершения механической работы. КПД мышц достигает 20—40%, а полный КПД живого организма, разумеется, несколько ниже. Работу, которую может совершить за сутки физически развитый человек, можно оценить примерно в 10^6 Дж. Такую работу, например, потребовалось бы совершить человеку массой 70 кг при подъеме с грузом в 30 кг на высоту 1 км.

Если при интенсивной физической нагрузке человек совершает работу в 10^6 Дж, а потребляет в среднем за сутки $500 \cdot 10^6$ Дж, то это значит, что на каждого человека в нашей стране работают различные тепловые машины, выполняющие работу 500 человек. Благодаря этому мы имеем все необходимое для удовлетворения своих материальных и духовных потребностей, затрачивая усилия, как правило, не на совершение механической работы при изготовлении различных вещей и сооружений, а лишь на управление машинами и автоматами.

§ 24. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

«Вечные двигатели». В истории техники известны многочисленные попытки создания машин, способных совершать работу без потребления энергии. *Воображаемую машину, способную совершать работу без того, чтобы изменялось состояние тел, входящих в эту машину, и без теплопередачи от внешних тел, называют в физике «вечным двигателем первого рода».* Согласно первому закону термодинамики любая замкнутая система может совершать положительную работу A' над другими телами только за счет уменьшения внутренней энергии системы ΔU либо за счет получения извне некоторого количества теплоты Q :

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

Следовательно, невозможно создание машины, способной совершать работу без изменения внутреннего состояния входящих в нее тел и без получения тепла от окружающих тел. Это утверждение кратко формулируется так: создание «вечного двигателя первого рода» невозможно.

Создание «вечного двигателя первого рода» было бы опровержением первого закона термодинамики, т. е. закона сохранения энергии.

Однако можно поставить перед собой более скромную, но чрезвычайно заманчивую задачу: создать машину, способную производить работу за счет отбора тепла у окружающих тел.

Если подсчитать, например, какая энергия выделилась бы при охлаждении Мирового океана, масса которого равна 10^{21} кг, на 1 К, то получается:

$$\begin{aligned} \Delta U = Q &= cm \cdot \Delta T = 4200 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \cdot 10^{21} \text{ кг} \cdot 1\text{К} = \\ &= 4,2 \cdot 10^{24} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Насколько это число велико, говорит сравнение его с уровнем потребления энергии во всем мире за год, составляющим примерно $2,5 \cdot 10^{20}$ Дж.

Сравнив эти цифры, мы видим, что охлаждение Мирового океана всего на 1 К обеспечило бы все человечество энергией при современном уровне ее потребления на 17 000 лет!

Запасы энергии теплового движения молекул в океане очень велики, но использовать их трудно. Теплопередача происходит лишь в направлении от горячего тела к холодному. Значит, для того чтобы часть энергии теплового движения молекул воды Мирового океана превратить в механическую энергию, необходимо иметь рабочее тело, температура которого ниже температуры воды в океане. Если в качестве такого тела использовать газ, то можно предложить очень простое устройство для превращения энергии теплового движения молекул воды в механическую энергию. Поместим рабочее тело (газ) в цилиндр с теплопроводящим дном и закрыем поршнем, способным перемещаться без трения. На поршень

поместим тело массой m . При осуществлении теплового контакта дна цилиндра с водой океана газ в цилиндре нагревается. В результате нагревания происходит изобарическое расширение газа и перемещение поршня на некоторое расстояние h . При этом тело массой m поднимается на высоту h , т. е. совершается механическая работа A' :

$$A' = mgh.$$

Однако на этом работа нашего устройства прекращается, так как между рабочим телом и водой океана устанавливается тепловое равновесие, нагревание и расширение газа прекращается. Чтобы продолжить получение тепла от океана и совершение за счет полученного тепла механической работы, необходимо рабочее тело (газ в цилиндре) вернуть в исходное состояние, т. е. охладить до начальной температуры.

Но если тепло само собой не переходит от холодного тела к горячему, может быть, можно создать машину, с помощью которой осуществлялся бы такой процесс? Периодически охлаждая газ в цилиндре с помощью такой машины, мы получили бы новую машину, преобразующую энергию теплового движения молекул в механическую работу.

Второе начало термодинамики. Возможность создания такой машины, называемой «вечным двигателем второго рода», не противоречит первому началу термодинамики. Однако все известные на сегодня результаты опытов свидетельствуют о том, что создание «вечного двигателя второго рода» является столь же неразрешимой задачей, как и изготовление «вечного двигателя первого рода». Этот опытный факт принят в термодинамике в качестве второго основного ее постулата — **второго закона термодинамики**.

Второе начало, или второй закон, термодинамики имеет несколько эквивалентных по своему физическому содержанию формулировок. Приведем две из них.

Неосуществим термодинамический процесс, в результате которого происходила бы передача тепла от одного тела к другому, более горячему, без каких-либо других изменений в природе.

Невозможно построить периодически действующую машину, которая непрерывно превращала бы теплоту в работу только за счет охлаждения одного тела, без того, чтобы в окружающих телах не произошло одновременно каких-либо изменений.

Физический смысл второго закона термодинамики заключается в том, что энергия теплового движения молекул вещества в одном отношении качественно отличается от всех других видов энергии — механической, электрической, химической, ядерной и т. д. Это отличие заключается в том, что *энергия любого вида, кроме энергии теплового движения молекул, может полностью превратиться в любой другой вид энергии, в том числе в энергию теплового движения. Энергия же теплового движения молекул может испытать превра-*

щение в любой другой вид энергии лишь частично. В результате этого любой физический процесс, в котором происходит превращение какого-либо вида энергии в энергию теплового движения молекул, является необратимым процессом, т. е. он не может быть осуществлен полностью в обратном направлении. Например, при падении мяча на пол происходит сначала превращение потенциальной энергии в кинетическую (обратимый процесс), затем кинетическая энергия превращается в потенциальную энергию деформированного мяча. При соударении мяча с полом и его деформации часть кинетической энергии превращается в энергию теплового движения молекул. Поэтому скорость мяча при отскоке оказывается меньше его скорости при падении, мяч после отскока поднимается на высоту h_2 , меньшую высоты h_1 , на какой он находился в начале опыта:

$$h_2 < h_1.$$

Является ли такой вывод абсолютно верным? Можно сказать, что такой вывод является не абсолютно верным, а наиболее вероятным. Действительно, та часть кинетической энергии, которая при ударе мяча превратилась в энергию теплового движения молекул мяча и пола, в принципе может вновь превратиться в кинетическую энергию поступательного движения мяча. Но возможно это в том случае, если все молекулы, скорость хаотического движения которых увеличилась в результате нагревания мяча и пола при ударе, в момент отрыва мяча от пола будут двигаться упорядоченно в вертикальном направлении и в результате взаимодействия отдадут избыточную энергию теплового движения, превратив ее в энергию поступательного движения мяча. Хотя случайный переход от беспорядочного движения к упорядоченному в тепловом движении теоретически возможен, для реальных тел, в которых количество молекул измеряется числами порядка 10^{23} — 10^{26} молекул, вероятность таких процессов настолько мала, что в любых практических расчетах ее можно считать равной нулю.

Второе начало термодинамики есть выражение всеобщего закона, согласно которому в природе самопроизвольно происходят лишь процессы, в результате которых упорядоченное движение переходит в беспорядочное, но беспорядочное движение не может полностью превратиться в упорядоченное.

Холодильник. Посмотрим, не опровергают ли второй закон термодинамики своей работой известные нам тепловые машины. Начнем с холодильника. Действие его как раз и заключается в том, что от более холодного тела, находящегося в морозильнике, отнимается некоторое количество тепла и передается более нагретому телу. Этим более нагретым телом является воздух в комнате, который в результате работы холодильника нагревается до еще более высокой температуры от конденсатора, обычно укрепленного на задней стенке холодильника.

Однако работа холодильника совершается не в противоречие второму закону термодинамики, а в полном соответствии с ним.

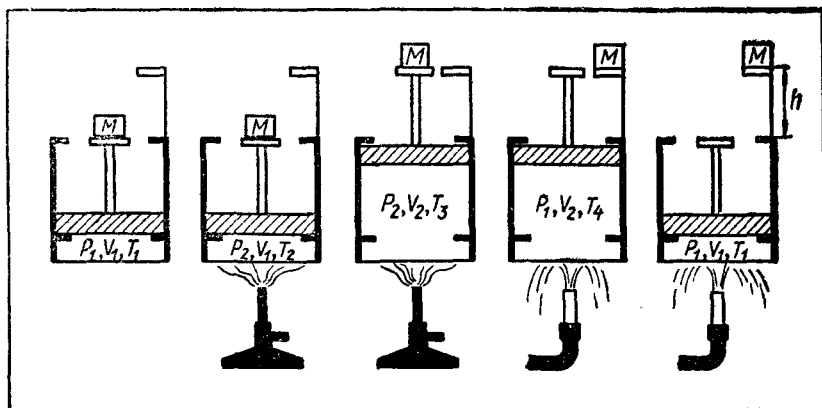


Рис. 28. Модель тепловой машины

Холодильник и воздух комнаты не составляют замкнутой системы. Для работы холодильника его необходимо подключить к электрической сети. Электрическая энергия с помощью электродвигателя превращается в механическую энергию, затем механическая энергия в результате работы компрессора превращается в конечном счете в энергию теплового движения молекул деталей холодильника и окружающих его тел. Следовательно, переход тепла от холодного тела к горячему не является единственным результатом работы холодильника, так как этот процесс сопровождается превращением энергии электрического тока в энергию теплового движения.

§ 25. РАБОЧИЙ ЦИКЛ ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрим подробнее принцип действия простейшего теплового двигателя. Пусть воображаемая машина состоит из цилиндра, в котором находится идеальный газ, и невесомого теплоизолирующего поршня. Поршень может перемещаться без трения в цилиндре, дно цилиндра хорошо проводит тепло, а стенки теплоизолированы (рис. 28).

В начальном состоянии объем газа в цилиндре V_1 , его давление равно атмосферному давлению p_1 , а начальное значение температуры T_1 .

Используем цилиндр с поршнем для совершения работы A' за счет передачи количества тепла Q газу, заключенному в цилиндре. Для этого поместим на поршень тело массой m , предварительно приняв меры против сжатия газа в цилиндре под действием давления груза на поршень (например, установив специальные упоры внутри цилиндра, предотвращающие дальнейшее опускание поршня).

Подведем под цилиндр нагреватель, используя, например, газовую горелку. По мере нагревания газа в цилиндре его давление

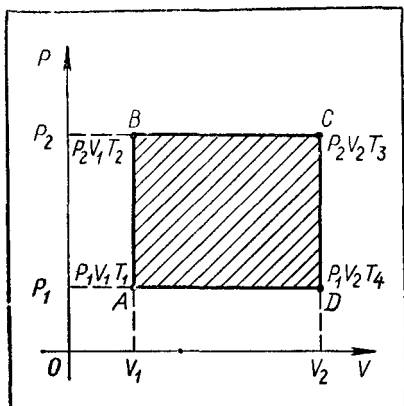


Рис. 29. Диаграмма рабочего цикла тепловой машины

возрастает, однако объем остается неизменным до тех пор, пока давление не достигнет значения p_2 , при котором сила давления поршня с грузом на газ уравнивается с силой давления газа на поршень. Этому процессу на диаграмме $p - V$ соответствует изохора AB (рис. 29). Значение температуры T_2 в конце изохорического процесса однозначно определяется значениями давления p_2 и объема V_1 через уравнение состояния идеального газа.

Поскольку при изохорическом процессе не совершается работа, то в соответствии с первым началом термодинамики все сообщенное газу количество тепла Q_{AB} израсходовано на увеличение внутренней энергии газа ΔU_{AB} :

$$Q_{AB} = U_{AB}.$$

При дальнейшем нагревании газа поршень придет в движение. Поскольку давление поршня с грузом на газ остается постоянным, расширение происходит по изобарическому закону. Пусть для подъема груза на высоту h требуется увеличить объем газа в цилиндре от значения V_1 до значения V_2 . Температура T_3 в конце изобарического процесса расширения газа однозначно определяется из уравнения состояния идеального газа значениями объема V_2 и давления p_2 .

Описанному процессу на диаграмме $p - V$ соответствует изобара BC на рисунке 29.

Когда поршень коснется ограничителя в верхней части цилиндра, т. е. газ расширится до объема V_2 , прекратим нагревание.

В процессе изобарического расширения газу было сообщено количество тепла Q_{BC} , которое было израсходовано на совершение работы A'_{BC} поднятия груза поршнем и на увеличение внутренней энергии газа ΔU_{BC} , т. е.

$$Q_{BC} = \Delta U_{BC} + A'_{BC}.$$

Работу, совершенную газом при расширении, можно подсчитать:

$$A'_{BC} = Fh = p_2 Sh = p_2 (V_2 - V_1),$$

где h — ход поршня.

Казалось бы, цель достигнута, груз поднят. Однако подобная машина одноразового действия не представляет интереса для практики. Для длительного действия машины, т. е. поднятия следующего груза, необходимо опустить поршень, т. е. сжать газ. Но если сжимать газ при температуре T_3 до объема V_1 , то в процессе сжатия давление возрастает. Поэтому работа, совершаемая при сжатии газа, окажется больше работы, совершенной газом при расширении. Следовательно, таким путем не удастся осуществить периодический процесс совершения механической работы за счет передачи количества теплоты рабочему телу машины.

Для уменьшения работы, совершаемой при сжатии, газ в цилиндре можно перед сжатием охладить. Тогда сжатие будет происходить при давлении p_1 , меньшем p_2 , и работа, совершаемая при сжатии, окажется меньше работы, совершенной газом при расширении.

Снимем груз с поршня и для охлаждения газа направим на дно цилиндра струю холодной воды. Понижение температуры газа будет сопровождаться понижением давления, однако объем будет оставаться неизменным до тех пор, пока давление газа в цилиндре не достигнет значения p_1 . Этому процессу на диаграмме (рис. 29) соответствует изохора CD . Температура T_4 в конце изохорического процесса однозначно определяется значениями давления p_1 и объема V_2 .

Для возвращения газа в исходное состояние, характеризуемое значениями p_1 , V_1 и T_1 , необходимо продолжить его охлаждение до температуры T_1 . Поскольку поршень скользит по стенкам без трения, то уменьшение объема газа до начального значения V_1 будет происходить при постоянном давлении p_1 , пока поршень не коснется нижнего ограничителя и газ не займет первоначальный объем V_1 . Этому процессу на рисунке соответствует изобара DA .

В процессе изохорического охлаждения работа не совершалась, так как поршень был неподвижен. При этом охлаждающая вода получила от газа количество теплоты Q_{CD} , вследствие чего внутренняя энергия газа уменьшилась на ΔU_{CD} . По первому закону термодинамики

$$-Q_{CD} = \Delta U_{CD}.$$

В процессе изобарического сжатия газа охлаждающая вода получила от газа количество тепла Q_{DA} , над газом была совершена работа сжатия A_{DA} и его внутренняя энергия уменьшилась на ΔU_{DA} . В соответствии с первым законом термодинамики

$$-Q_{DA} = \Delta U_{DA} - A_{DA}.$$

Процессы, в результате совершения которых газ возвращается в исходное состояние, называются круговыми или циклическими. Рабочий цикл рассмотренной тепловой машины состоит из двух

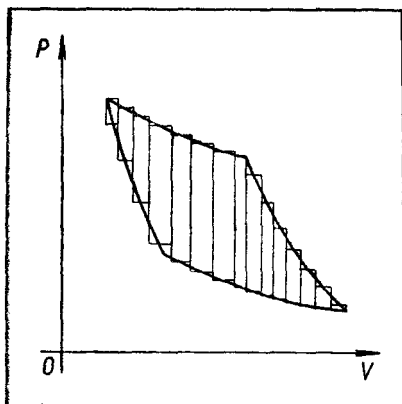


Рис. 30. Представление диаграммы произвольного рабочего цикла

изохор и двух изобар, образующих на диаграмме $p - V$ прямоугольник $ABCD$ (рис. 29).

Покажем, что работа, произведенная машиной в результате совершения рабочего цикла по поднятию тела массой m на высоту h $A = mgh$, численно равна площади цикла на диаграмме $p - V$ в единицах, отложенных по осям координат.

Как видно из рисунка 29, площадь прямоугольника $ABCD$ на диаграмме $p - V$ равна:

$$S_{ABCD} = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1) = \Delta p \cdot \Delta V.$$

Если S — площадь поршня, то

$$p_2 = p_1 + \frac{mg}{S}, \text{ а } \Delta p = p_2 - p_1 = \frac{mg}{S} \text{ и } \Delta V = Sh,$$

тогда

$$S_{ABCD} = \frac{mg}{S} \cdot Sh = mgh.$$

Если при рабочем цикле состояние газа в цилиндре изменялось не по изохорическому и изобарическому законам, а каким угодно другим путем, то диаграмму цикла можно приближенно представить как совокупность циклов, состоящих из двух изохор и двух изобар (рис. 30). Отсюда можно сделать вывод, что *работа, совершаемая газом в результате изменений его состояний по любому замкнутому циклу, пропорциональна площади цикла на диаграмме $p - V$.*

§ 26. КПД ТЕПЛОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

Коэффициент полезного действия η теплового двигателя определяется отношением полезной работы A' , совершенной двигателем, к количеству теплоты Q_1 , полученному им от нагревателя:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1}.$$

В результате завершения замкнутого цикла газ в цилиндре находится в исходном состоянии и обладает тем же запасом внутренней энергии U , каким он обладал в исходном состоянии, т. е. $\Delta U = 0$. Поэтому из первого начала термодинамики следует:

$$A + Q = 0, \quad A = -Q,$$

где A — работа, совершенная над газом в цилиндре, Q — количество теплоты, переданное газу в течение цикла. Количество теплоты, переданное газу за цикл, равно разности:

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

где Q_1 — количество теплоты, полученное от нагревателя, Q_2 — количество теплоты, переданное холодильнику. Переходя от работы A , совершенной внешними силами над газом в цилиндре, к работе A' , совершенной газом над внешними телами:

$$A' = -A, \quad A' = Q,$$

получим для коэффициента полезного действия тепловой машины следующее выражение:

$$\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}.$$



С. Карно

Впервые на необходимость использования для работы тепловой машины двух тел с различными температурами нагревателя и холодильника указал французский инженер Сади Карно в работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу», опубликованной в 1824 г. В качестве исходного положения в своих теоретических расчетах Карно использовал принцип невозможности осуществления вечного двигателя, заложив тем самым основание термодинамики как метода научного исследования.

Карно не только сформулировал второй закон термодинамики, но и высказал в общей форме закон сохранения и превращения энергии. Он установил также чрезвычайно важную для практики зависимость КПД тепловой машины от разности температур нагревателя и холодильника: **максимально достижимый КПД тепловой машины любой конструкции независимо от выбора рабочего тела определяется выражением:**

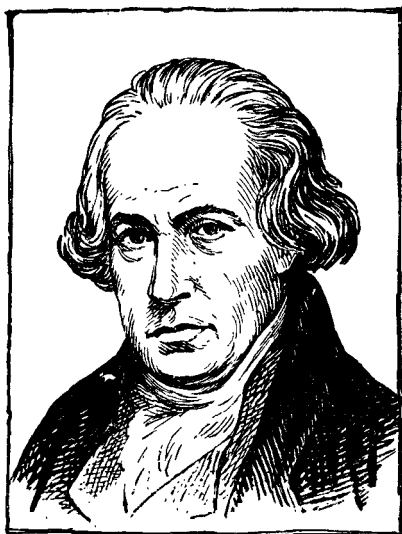
$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, T_2 — температура холодильника. Следовательно, любая реальная тепловая машина может иметь лишь КПД

$$\eta \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$



И. И. Ползунов



Д. Уатт

Анализ этого выражения показывает, что для повышения КПД тепловых машин существует два пути: повышение температуры нагревателя T_1 и понижение температуры холодильника T_2 . Значение КПД тепловой машины могло бы стать равным единице, если бы имелась возможность использовать холодильник с температурой, равной абсолютному нулю:

$$T_2 = 0, \quad \eta = \frac{T_1}{T_1} = 1.$$

Однако этот путь даже теоретически неосуществим, так как абсолютный нуль, согласно представлениям термодинамики, не может быть достигнут. Любой способ охлаждения рабочего тела может привести к снижению его температуры до сколько угодно малой величины, но все же большей абсолютного нуля.

Наиболее приемлемыми холодильниками для реальных тепловых машин являются атмосферный воздух или вода при температуре около 300 К. Так как масса земной атмосферы или воды в реках и океане очень велика, даже в результате длительного использования в качестве холодильников при работе тепловых машин температура их остается практически неизменной. Однако при использовании холодильника с температурой $T_2 = 300$ К для получения высоких значений КПД тепловой машины необходимо иметь нагреватель со значительно более высокой температурой. Так, например, если использовать нагреватель с температурой $T_1 = 373$ К, а холодильник с температурой $T_2 = 273$ К, то максимальное значение КПД тепловой машины оказывается равным лишь

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{373 - 273}{373} \approx 0,27.$$

Следовательно, основной путь повышения КПД тепловых машин — это повышение температуры нагревателя.

Вытеснение в современной технике паровых машин двигателями внутреннего сгорания и газовыми турбинами в значительной мере объясняется более высокими значениями их КПД из-за более высоких значений температуры рабочего тела.

§ 27. ПАРОВАЯ МАШИНА

Паровая машина И. И. Ползунова. Первые практически действующие универсальные паровые машины были созданы русским изобретателем **И в а н о м** **И в а н о в и ч е м** **П о л з у н о в ы м** и англичанином **Д ж е м с о м** **У а т т о м**. Схема машины И. И. Ползунова показана на рисунке 31.

Рабочий процесс в машине Ползунова совершался следующим образом. Из котла 2, имеющего топку 1, по трубам 3 пар с давлением, немного превышающим атмосферное, поступал поочередно в два цилиндра 5 и 6 с поршнями. Для улучшения уплотнения поршни заливались водой. Посредством тяг 10 и полубалансиров 9 с цепями движение поршней было взаимосвязанным, согласованным.

В положении, изображенном на рисунке 31, когда поршень левого цилиндра 5 находится внизу, а поршень правого цилиндра 6 вверху, парораспределительное устройство 4 открывало доступ пару из котла в левый цилиндр 5 и отключало от котла уже заполненный паром правый цилиндр, по трубам 7 из бака 8 в него впрыскивалась вода.

В результате интенсивной конденсации пара в правом цилиндре 6 создавалось разрежение.

Под действием атмосферного давления поршень правого цилиндра опускался вниз, совершая рабочий ход, а левый цилиндр, заполняемый паром, двигался вверх. По достижении левым цилиндром верхнего положения, а правым — нижнего в левый цилиндр впрыскивалась вода, а в правый подавался пар.

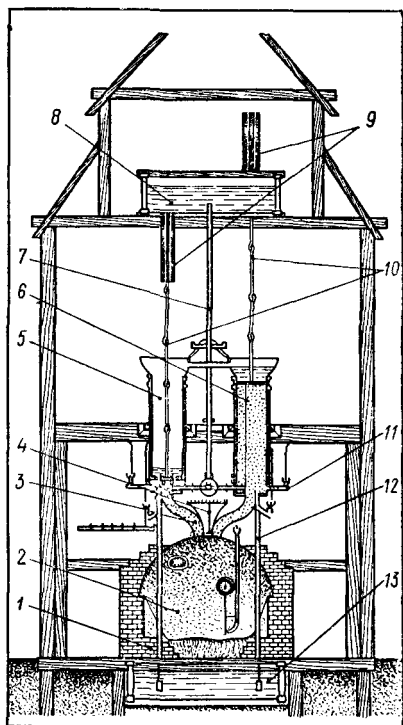


Рис. 31. Схема устройства паровой машины И. И. Ползунова

Затем происходило повторение рабочих процессов, в результате которых полубалансиры совершали возвратно-вращательное движение. Попадавший в цилиндр воздух выпускался через клапаны воздушных труб 11. Отработанная теплая вода, как впрыснутая в цилиндр, так и образовавшаяся в результате конденсации пара, по трубам 12 стекала в бак 13 под топкой, а оттуда вновь поступала в котел. Так частично использовалось тепло отработавшего пара.

Постройка машины Ползунова была закончена в августе 1766 г. Она имела высоту 11 м, емкость котла 7 м³, высоту цилиндров 2,8 м, мощность 29 кВт. Движение ее поршней было связано с воздушными мехами, обеспечивавшими дутьем три медеплавильные печи.

В отличие от предшествующих ей машин, работавших рывками и выполнявших только роль водоподъемных насосов, машина Ползунова создавала непрерывное усилие и была первой универсальной машиной, которую можно было применять для приведения в движение любых заводских механизмов.

При дальнейшем усовершенствовании паровой машины Д. Уаттом два цилиндра были заменены одним закрытым. Пар поступал попеременно по обе стороны поршня, толкая его то в одну, то в другую сторону. В такой машине двойного действия отработавший пар конденсировался не в цилиндре, а в отделенном от него сосуде — конденсаторе. Постоянство числа оборотов маховика поддерживалось центробежным регулятором.

Конструкция первых паровых машин имела основные части всех последующих паровых машин: 1 — нагреватель, в котором освобождалась энергия топлива; 2 — водяной пар как рабочее тело и поршень с цилиндром, преобразующий внутреннюю энергию пара в механическую энергию; 3 — охладитель, необходимый для снижения температуры и давления пара в цилиндре.

КПД паровой машины. Первые паровые машины, естественно, имели серьезные конструктивные недостатки. Например, желание сделать котел дешевым и безопасным в работе приводило к необходимости использовать пар низкого давления, а для получения большой мощности это вынуждало делать цилиндры диаметром около 2 м с ходом поршня в 3 м. Соответственно этому приходилось увеличивать и все другие детали машины. Так, водоподъемная машина Ньюкомена — Коули достигала высоты 4—5-этажного дома.

Но главным недостатком первых паровых машин был низкий КПД. Даже у современных паровозов КПД не превышает 9%.

§ 28. ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Поршневой двигатель внутреннего сгорания. Среди способов увеличения КПД тепловых двигателей один оказался особенно плодотворным. Сущность его состояла в устранении части потерь теплоты перенесением места сжигания топлива и нагревания рабочего тела внутрь цилиндра. Отсюда и происхождение названия «дви-

гатель внутреннего сгорания». Естественно, что для двигателей внутреннего сгорания наиболее удобным видом топлива является газообразное или жидкое топливо.

Первый двигатель внутреннего сгорания был создан в 1860 г. французским инженером Э т ь е н о м Л е н у а р о м. Этот двигатель не имел трубы, топки и котла, но в основном конструктивно не отличался от паровой машины. Вместо пара в цилиндр при движении поршня засасывалась смесь светильного газа и воздуха. Когда поршень проходил расстояние, равное половине своего хода, закрывался впускной клапан и горючая смесь воспламенялась электрической искрой. Под давлением продуктов сгорания поршень двигался дальше, совершая рабочий ход. В конце рабочего хода открывался выпускной клапан и поршень при обратном ходе выталкивал продукты сгорания из цилиндра.

КПД первого двигателя внутреннего сгорания был 3,3% — меньше, чем у современных ему паровых машин. Однако новые двигатели вскоре были значительно усовершенствованы. В 1862 г. французским инженером Б о д е Р о ш а было предложено использовать в двигателе внутреннего сгорания ч е т ы р е х т а к т н ы й ц и к л: 1) всасывание, 2) сжатие, 3) горение и расширение, 4) выхлоп. Эта идея была использована немецким изобретателем Н. О т т о, построившим в 1878 г. первый четырехтактный газовый двигатель внутреннего сгорания. КПД этого двигателя достигал 22%, что превосходило значения, полученные при использовании двигателей всех предшествующих типов.

Карбюраторный двигатель. Развитием нефтяной промышленности в конце XIX в. дало новые виды топлива — керосин и бензин. В бензиновом двигателе для более полного сгорания топлива перед пуском в цилиндр его смешивают с воздухом в специальных смесителях, называемых к а р б ю р а т о р а м и. Воздушно-бензиновую смесь называют г о р ю ч е й с м е с ь ю.

Бензин представляет собой смесь нескольких соединений, близких по своим химическим и физическим свойствам. Химические реакции, происходящие при сжигании бензина, можно рассмотреть на таком примере:



Из этого уравнения следует, что теоретически полное сгорание топлива в бензиновом двигателе происходит тогда, когда в воздушно-бензиновой смеси на каждую молекулу бензина приходится 9 молекул кислорода. Оценим, каким же должно быть при этом соотношение масс воздуха m_v и бензина m_b в поступающей в цилиндр горючей смеси. Если в смеси на одну молекулу бензина приходится одна молекула кислорода, то отношение масс бензина и кислорода должно быть равно отношению их молярных масс:

$$\frac{m_b}{m_k} = \frac{M_b}{M_k} = \frac{86}{32}.$$

Но на долю кислорода по массе в воздухе приходится лишь 23%, следовательно, в воздушно-бензиновой смеси, в которой на одну молекулу бензина приходится 9 молекул кислорода, должно быть следующее соотношение масс паров бензина и воздуха:

$$\frac{m_б}{m_в} = \frac{0,23 \cdot M_б}{9 \cdot M_к} = \frac{0,23 \cdot 86}{9 \cdot 32} \approx \frac{1}{15}$$

Мы получили, что для полного сгорания в составе смеси на один килограмм бензина должно приходиться не менее пятнадцати килограмм воздуха.

Это означает, что рабочим телом в двигателях внутреннего сгорания фактически является воздух, а не пары бензина. В отличие от паровых машин здесь топливо сжигается для нагревания газа, а не для превращения жидкости в пар. Правда, наряду с нагреванием воздуха происходит и частичное изменение его состава: вместо молекул кислорода появляется несколько большее количество молекул углекислого газа и водяного пара. Азот, составляющий более 3/4 воздуха, испытывает лишь нагревание.

При движении поршня от верхнего положения до нижнего через впускной клапан происходит засасывание горючей смеси в цилиндр (рис. 32). Этот процесс происходит при постоянном давлении. При обратном ходе поршня начинается сжатие горючей смеси. Сжатие происходит быстро, и поэтому процесс близок к адиабатическому. На диаграмме $p - V$ ему соответствует участок AB (рис. 33).

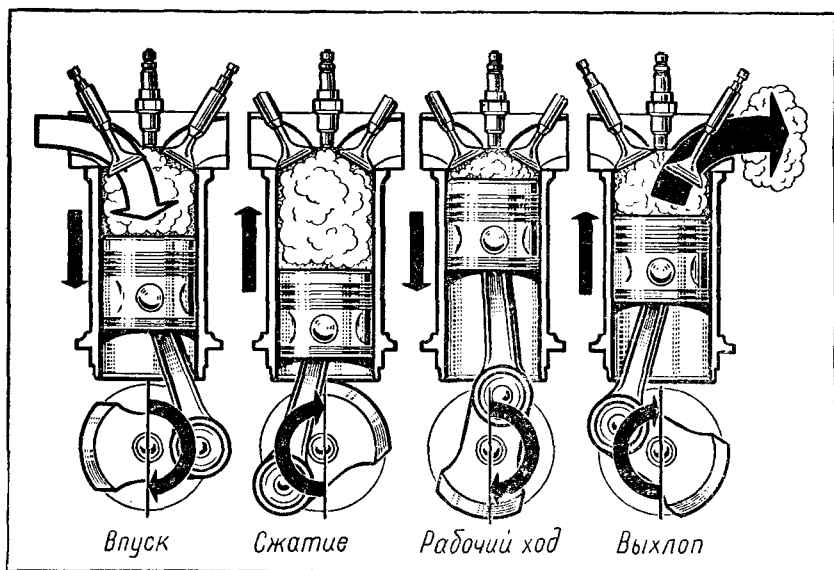


Рис. 32. Четырехтактный двигатель внутреннего сгорания

В конце такта сжатия происходит воспламенение горючей смеси электрической искрой. Быстрое сгорание паров бензина сопровождается передачей рабочему телу — воздуху — количества тепла Q_1 , резким возрастанием температуры и давления воздуха и продуктов сгорания. За короткое время горения смеси поршень практически не изменяет своего положения в цилиндре, поэтому процесс нагревания газа в цилиндре можно считать изохорическим и изобразить его на диаграмме $p - V$ участком BC .

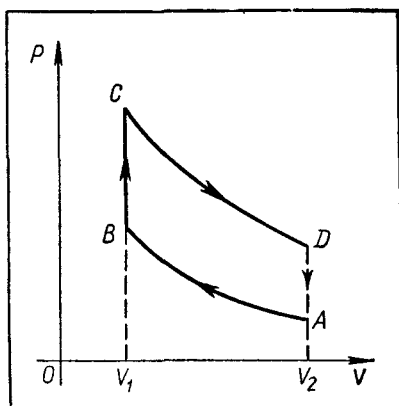


Рис. 33. Диаграмма рабочего цикла карбюраторного двигателя внутреннего сгорания

Под действием высокого давления поршень далее совершает рабочий ход от верхнего положения до нижнего. Этот процесс расширения рабочего тела от объема V_1 до объема V_2 близок к адиабатическому, ему соответствует на диаграмме $p - V$ адиабата CD .

В конце рабочего такта открывается выпускной клапан и рабочее тело соединяется с окружающей атмосферой. Выпуск отработанных газов сопровождается передачей количества тепла Q_2 окружающему воздуху, играющему роль охладителя.

При длительной работе двигателя описанный цикл повторяется многократно. Но перед началом каждого цикла необходимо освободить цилиндр от продуктов сгорания, не содержащих кислорода, и произвести всасывание горючей смеси. Это осуществляется во время двух подготовительных тактов выхлопа и всасывания.

Для поршневых двигателей внутреннего сгорания важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и значительно влияющей на величину КПД, является степень сжатия горючей смеси:

$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1},$$

где V_2 и V_1 — объемы в начале и в конце сжатия. С увеличением степени сжатия возрастает начальная температура горючей смеси в конце такта сжатия, что способствует более полному ее сгоранию. У современных карбюраторных двигателей ε обычно составляет 8—9. Дальнейшему увеличению степени сжатия препятствует самовоспламенение (детонация) горючей смеси, происходящее еще до того, как поршень достигнет верхней мертвой точки. Это явление оказывает разрушающее действие на двигатель и снижает его мощность и КПД. Достигнуть указанных степеней

сжатия без детонации удалось увеличением скорости движения поршня при повышении числа оборотов двигателя до 5—6 тыс. об/мин и применением бензина со специальными антидетонационными присадками.

Двигатель Дизеля. Для дальнейшего повышения КПД двигателя внутреннего сгорания в 1892 г. немецкий инженер Рудольф Дизель предложил использовать еще большие степени сжатия рабочего тела и расширение при постоянной температуре. Однако при испытаниях опытных образцов двигателей Дизелю пришлось отказаться от второй идеи, заменив процесс расширения при постоянной температуре предлагавшимся ранее процессом расширения при постоянном давлении.

Высокая степень сжатия без детонации достигается в двигателе Дизеля за счет того, что сжатию подвергается не горючая смесь, а только воздух. По окончании процесса сжатия в цилиндр впрыскивается горючее. Для его зажигания не требуется никакого специального устройства, так как при высокой степени адиабатического сжатия воздуха его температура повышается до 600—700 °С. Горючее, впрыскиваемое с помощью топливного насоса через форсунку, воспламеняется при соприкосновении с раскаленным воздухом.

Подача топлива управляется особым регулятором, в результате чего процесс горения протекает не столь кратковременно, как в карбюраторном двигателе, а происходит более длительное время. Поэтому часть процесса расширения, пока осуществляется подача топлива, происходит изобарически, а затем адиабатически. При обратном движении поршня осуществляется выхлоп. Диаграмма цикла в двигателе Дизеля представлена на рисунке 34.

Современные дизели имеют степень сжатия $\epsilon = 16\text{--}21$ и КПД около 40%. Более высокий коэффициент полезного действия дизельных

двигателей обусловлен тем, что вследствие более высокой степени сжатия начальная температура горения смеси (480—630 °С) у них выше, чем у карбюраторных двигателей (330—480 °С). Этим обеспечивается более полное сгорание дизельного топлива.

Другая причина более низкого КПД карбюраторного двигателя заключается в маломощном, недостаточно эффективном «точечном» искровом зажигании. Ранее указывалось, что для сгорания 1 кг бензина требуется около 15 кг воздуха. Кажется бы, уве-

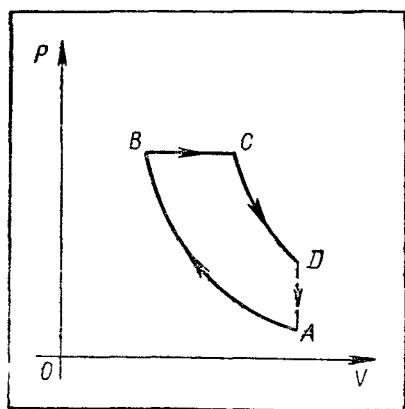


Рис. 34. Диаграмма рабочего цикла двигателя Дизеля

личение количества воздуха в цилиндре, или, как говорят, обеднение смеси, должно улучшить сгорание бензина и повысить экономичность двигателя. Однако при избытке воздуха более чем на 10—15% горение смеси происходит недостаточно быстро, а при избытке воздуха на 20—25% бензиново-воздушная смесь вообще не воспламеняется. Работу двигателя на экономичной обедненной смеси не обеспечивает искровой способ зажигания. Объем, занимаемый искрой, очень мал по сравнению с объемом цилиндра, и за время рабочего хода поршня весь бензин не успевает вступить в соединение с кислородом. Поэтому бензиновые двигатели обычно работают на обогащенной смеси, в которой из-за недостатка кислорода бензин не может сгореть полностью. Это приводит к снижению их КПД.

Дизельные двигатели работают на обедненной смеси. Более полное сгорание топлива в дизельном двигателе приводит к повышению его КПД и уменьшению токсичности выхлопных газов.

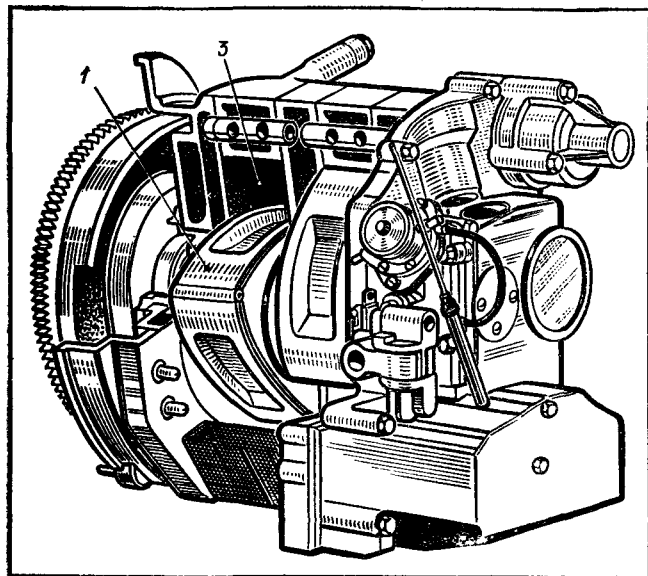
Двигатель Ванкеля. Патент на роторно-поршневой двигатель внутреннего сгорания немецкий инженер Фелкс Ванкель получил в 1929 г., однако первый работоспособный роторный двигатель был построен лишь в 1957 г. В настоящее время серийное производство автомобилей с роторными двигателями осуществляется в ряде стран.

Большой интерес к новому двигателю внутреннего сгорания вполне обоснован. В роторном двигателе возвратно-поступательное движение поршня заменяется непрерывным вращательным движением ротора. Это уменьшает механические нагрузки и обуславливает плавность работы двигателя.

Устройство роторного двигателя представлено на рисунке 35. Трехгранный ротор 1 вращается на подшипнике, установленном между эксцентриковым валом 2 и ротором, внутри рабочей полости 3 сложной формы. Форма рабочей полости такова, что при вращении ротора его грани непрерывно скользят по поверхности рабочей полости. При вращении ротора между ним и поверхностью рабочей полости образуются три камеры сгорания (см. цветную вклейку II). Рабочая смесь всасывается в камеру (1—2—3—4), затем сжимается (5—6), воспламеняется (7), расширяется (8—9) и выпускается (10—11—12—13). Для того чтобы сжатая смесь не выходила в соседнюю камеру, грани ротора герметизированы уплотнителями.

При вращении ротора происходит зацепление его шестерни с неподвижной шестерней на стенке 4. Движение ротора в рабочей полости вызывает вращение эксцентрикового вала. Соотношение числа зубьев шестерен 2/3 приводит к тому, что вал вращается в три раза быстрее ротора.

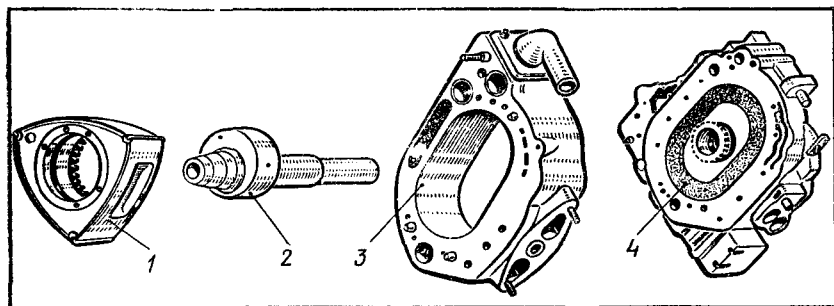
Главные достоинства «ванкеля» — компактность, использование почти вдвое меньшего количества деталей, чем в поршневом двигателе, хорошая уравновешенность. Масса и размеры роторного двигателя в два-три раза меньше, чем у поршневого двигателя такой же мощности.



a

Рис. 35. Внешний вид (а) и основные детали (б) двигателя Вайкеля:

1 — ротор; 2 — эксцентриковый вал; 3 — корпус с рабочей полостью; 4 — боковая крышка с неподвижной шестерней



б

Однако есть у роторного двигателя и серьезные недостатки: повышенный расход топлива (на 20—30% выше, чем в поршневом двигателе), более сложная технология изготовления основных деталей.

§ 29. ПАРОВАЯ И ГАЗОВАЯ ТУРБИНЫ

Паровая турбина. Попытки сконструировать паровую турбину, способную конкурировать с паровой машиной, до середины XIX в. были безуспешными, так как в механическую энергию вращения турбины удавалось преобразовать лишь незначительную долю кинетической энергии струи пара. Дело в том, что изобрета-

тели не учитывали зависимость КПД турбины от соотношения скорости пара и линейной скорости лопаток турбины.

Выясним, при каком соотношении скорости \vec{v}_1 струи газа и линейной скорости \vec{v}_2 лопатки турбины произойдет наиболее полная передача кинетической энергии струи газа лопатке турбины (рис. 36). При полной передаче кинетической энергии пара лопатке турбины скорость струи относительно Земли должна быть равна нулю, т. е. $\vec{v}_4 = 0$.

В системе отсчета, движущейся со скоростью \vec{v}_2 , скорость струи равна: $\vec{v}_3 = \vec{v}_1 - \vec{v}_2$.

Так как в этой системе отсчета лопатка в момент взаимодействия со струей неподвижна, то скорость струи после упругого отражения остается неизменной по модулю, но меняет направление на противоположное:

$$\vec{v}'_4 = -\vec{v}_3 = \vec{v}_2 - \vec{v}_1.$$

Переходя вновь в систему отсчета, связанную с Землей, получим скорость струи после отражения:

$$\vec{v}_4 = \vec{v}'_4 + \vec{v}_2 = 2\vec{v}_2 - \vec{v}_1.$$

Так как $v_4 = 0$, то

$$v_2 = \frac{1}{2} v_1.$$

Мы получили, что полная передача кинетической энергии струи турбине будет происходить при условии, когда линейная скорость движения лопаток v_2 турбины вдвое меньше скорости струи v_1 .

Первая паровая турбина, нашедшая практическое применение, была изготовлена шведским инженером Густавом Лавалем в 1889 г. Ее мощность была меньше 4 кВт при частоте вращения 30 000 об/мин.

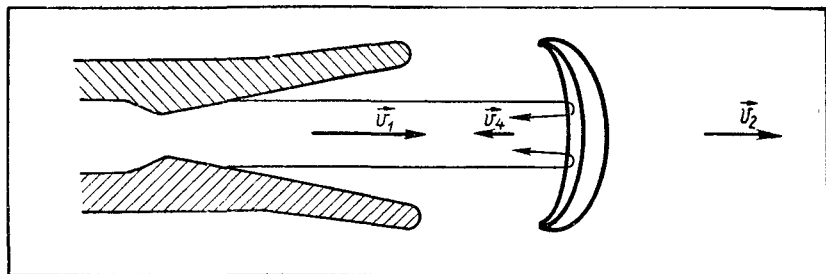


Рис. 36. Передача кинетической энергии струи пара лопатке турбины

Большая скорость истечения газа даже при средних перепадах давлений, составляющая примерно 1200 м/с, требует для эффективной работы турбины придания ее лопаткам линейной скорости около 600 м/с. Следовательно, для достижения высоких значений КПД турбина должна быть быстроходной. Нетрудно подсчитать силу инерции, действующую на лопатку турбины массой 1 кг, расположенную на ободе ротора радиусом 1 м, при скорости лопатки 600 м/с:

$$F = \frac{mv^2}{R} = \frac{1 \text{ кг} \cdot 36 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{с}^2}{1 \text{ м}} = 3,6 \cdot 10^5 \text{ Н}.$$

Возникает принципиальное противоречие: для экономичной работы турбины требуются сверхзвуковые скорости вращения ротора, но при таких скоростях турбина разрушится силами инерции. Для разрешения этого противоречия приходится конструировать турбины, вращающиеся со скоростью, меньшей оптимальной, но для полного использования кинетической энергии струи пара делать их многоступенчатыми, насаживая на общий вал несколько роторов возрастающего диаметра. Из-за недостаточно большой скорости вращения турбины пар отдает только часть своей кинетической энергии ротору меньшего диаметра. Затем отработавший в первой ступени пар направляется на второй ротор большего диаметра, отдавая его лопаткам часть оставшейся кинетической энергии и т. д. Отработавший пар конденсируется в холодильнике-конденсаторе, а теплая вода направляется в котел.

Цикл паротурбинной установки в координатах $p - V$ показан на рисунке 37. В котле рабочее тело получает количество тепла Q_1 , нагревается и расширяется при постоянном давлении (изобара AB). В турбине пар адиабатически расширяется (адиабата BC), совершая работу по вращению ротора. В конденсаторе-охладителе, омываемом, например, речной водой, пар отдает воде количество тепла Q_2 и конденсируется при постоянном давлении. Этому процессу соответствует изобара CD . Теплая вода из конденсатора насосом подается в котел. Этому процессу соответствует изохора DA . Как видно, цикл паротурбинной установки замкнутый. Работа пара за один цикл численно равна площади фигуры $ABCD$.

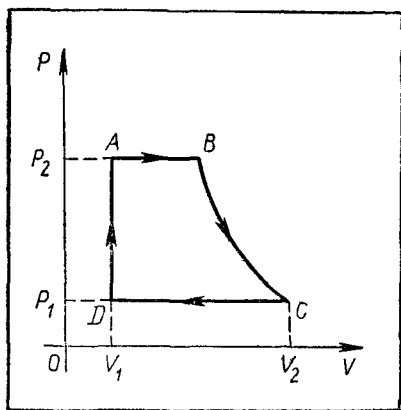


Рис. 37. Диаграмма рабочего цикла паротурбинной установки

Современные паровые турбины обладают высоким КПД преобразования кинетической

энергии струи пара в механическую энергию, несколько превышающим 90%. Поэтому электрические генераторы практически всех тепловых и атомных электростанций мира, дающие более 80% всей вырабатываемой электроэнергии, приводятся в действие паровыми турбинами.

Так как температура пара, применяемого в современных паротурбинных установках, не превышает 580 °С (температура нагревателя $T_1 = 853$ К), а температура пара на выходе из турбины обычно не ниже 30 °С (температура холодильника $T_2 = 303$ К), максимальное значение КПД паротурбинной установки как тепловой машины равно:

$$\eta_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{853 \text{ К} - 303 \text{ К}}{853 \text{ К}} \approx 0,65,$$

а реальные значения КПД паротурбинных конденсационных электростанций достигают лишь около 40%.

Мощность современных энергоблоков котел — турбина — генератор достигает $6 \cdot 10^5$ — $8 \cdot 10^5$ кВт. На очереди в 10-й пятилетке сооружение энергоблоков мощностью до $1,2 \cdot 10^6$ кВт.

Паротурбинные двигатели нашли широкое применение на водном транспорте. Однако их применению на сухопутном транспорте и тем более в авиации препятствует необходимость иметь топку и котел для получения пара, а также большое количество воды для использования в качестве рабочего тела.

Газовые турбины. Мысль об устранении топки и котла в тепловой машине с турбиной путем перенесения места сжигания топлива в само рабочее тело давно занимала конструкторов. Но разработка таких турбин внутреннего сгорания, в которых рабочим телом является не пар, а расширяющийся от нагревания воздух, сдерживалась отсутствием материалов, способных работать длительное время при высоких температурах и больших механических нагрузках.

Газотурбинная установка состоит из воздушного компрессора 1, камер сгорания 2 и газовой турбины 3 (рис. 38). Компрессор состоит из ротора, укрепленного на одной оси с турбиной, и неподвижного направляющего аппарата.

При работе турбины ротор компрессора вращается. Лопатки ротора имеют такую форму, что при их вращении давление перед компрессором понижается, а за ним повышается. Воздух засасывается в компрессор, и давление его за первым рядом лопаток ротора повышается. За первым рядом лопаток ротора расположен ряд лопаток неподвижного направляющего аппарата компрессора, с помощью которого изменяется направление движения воздуха и обеспечивается возможность его дальнейшего сжатия с помощью лопаток второй ступени ротора и т. д. Несколько ступеней лопаток компрессора обеспечивают повышение давления воздуха в 5—7 раз.

Процесс сжатия протекает адиабатически, поэтому температура воздуха значительно повышается, достигая 200 °С и более.

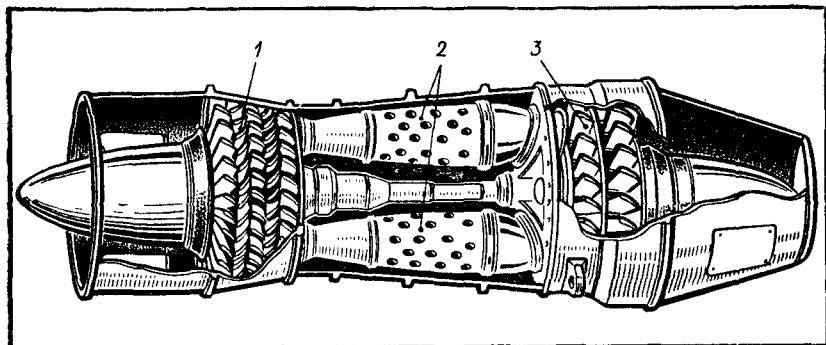


Рис. 38. Устройство газотурбинной установки

Сжатый воздух поступает в камеру сгорания (рис. 39). Одновременно через форсунку в нее впрыскивается под большим давлением жидкое топливо — керосин, мазут.

При горении топлива воздух, служащий рабочим телом, получает некоторое количество тепла и нагревается до температуры 1500—2200 °С. Нагревание воздуха происходит при постоянном давлении, поэтому воздух расширяется и скорость его движения увеличивается.

Движущиеся с большой скоростью воздух и продукты горения направляются в турбину. Переходя от ступени к ступени, они отдают свою кинетическую энергию лопаткам турбины. Часть полученной турбиной энергии расходуется на вращение компрессора, а остальная используется, например, для вращения винта самолета или ротора электрического генератора.

Для предохранения лопаток турбины от разрушающего действия раскаленной и высокоскоростной газовой струи в камеру сго-

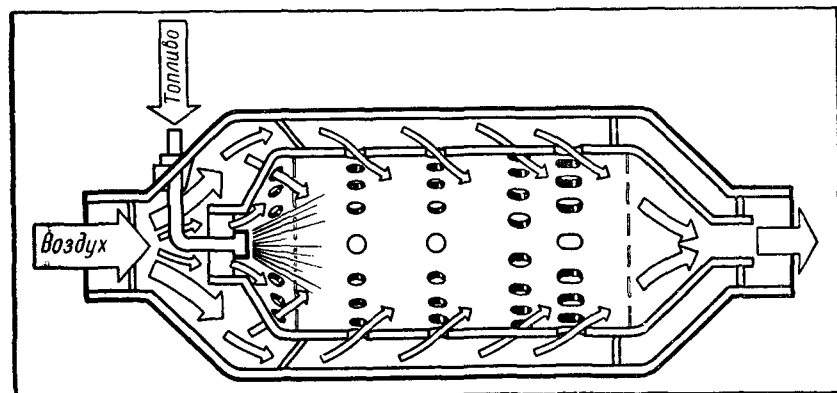


Рис. 39. Камера сгорания

рания нагнетается с помощью компрессора значительно больше воздуха, чем необходимо для полного сжигания топлива. Воздух, входящий в камеру сгорания за зоной горения топлива (рис. 38), снижает температуру газовой струи, направляемой на лопатки турбины. Понижение температуры газа в турбине ведет к снижению КПД, поэтому ученые и конструкторы ведут поиски путей повышения верхнего предела рабочей температуры в газовой турбине. В некоторых современных авиационных газотурбинных двигателях температура газа перед турбиной достигает 1330 °С.

Отработавший воздух вместе с продуктами сгорания при давлении, близком к атмосферному, и температуре более 500 °С со скоростью более 500 м/с обычно выбрасывается в атмосферу либо для повышения КПД направляется в теплообменник, где отдает часть тепла на нагревание воздуха, поступающего в камеру сгорания.

Цикл работы газотурбинной установки на диаграмме $p - V$ представлен на рисунке 40. Процессу сжатия воздуха в компрессоре соответствует адиабата AB , процессу нагревания и расширения в камере сгорания — изобара BC . Адиабатический процесс расширения горячего газа в турбине представлен участком CD , процесс охлаждения и уменьшения объема рабочего тела представлен изобарой DA .

КПД газотурбинных установок достигает значений 25—30%. У газотурбинных двигателей нет громоздких паровых котлов, как у паровых машин и паровых турбин, нет поршней и механизмов, преобразующих возвратно-поступательное движение во вращательное, как у паровых машин и двигателей внутреннего сгорания. Поэтому газотурбинный двигатель занимает втрое меньше места, чем дизель той же мощности, а его удельная масса (отношение массы к мощности) в 6—9 раз меньше, чем у авиационного поршневого двигателя внутреннего сгорания. Компактность и быстроходность в сочетании с большой мощностью на единицу массы определили первую практическую важную область применения газотурбинных двигателей — авиацию.

Самолеты с винтом, насаженным на вал газотурбинного двигателя, появились в 1944 г. Турбовинтовые двигатели имеют такие известные самолеты, как АН-24, ТУ-114, ИЛ-18, АН-22 — «Антей».

Максимальная масса «Антея» на взлете 250 т, грузоподъемность 80 т, или 720 пассажиров,

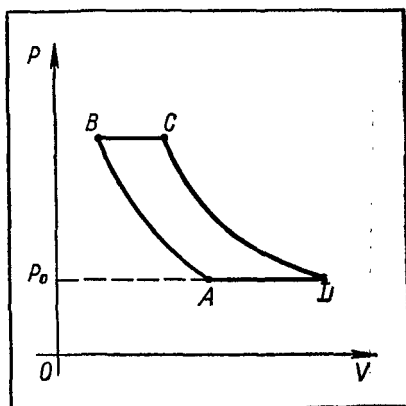


Рис. 40. Диаграмма рабочего цикла газотурбинной установки

скорость 740 км/ч, мощность каждого из четырех двигателей 11 000 кВт.

Газотурбинные двигатели начинают вытеснять паротурбинные на водном транспорте, особенно на кораблях военно-морского флота. Переход от дизельных двигателей на газотурбинные позволил увеличить грузоподъемность судов на подводных крыльях в четыре раза, с 50 до 200 т.

Газотурбинные двигатели мощностью 220—440 кВт устанавливаются на большегрузных автомобилях. Проходит испытание в горнодобывающей промышленности 120-тонный БелАЗ-549В с газотурбинным двигателем.

§ 30. РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Турбореактивный двигатель. Вместо вращения винта самолета, теплохода или ротора электрогенератора газовая турбина может быть использована как реактивный двигатель. Воздух и продукты горения выбрасываются из газовой турбины с большой скоростью. Реактивная сила тяги, возникающая при этом, может быть использована для движения самолета, теплохода или железнодорожного состава.

Основное отличие турбореактивного двигателя от турбовинтового заключается в том, что в нем газовая турбина используется лишь для приведения в действие воздушного компрессора и отнимает у газовой струи, выходящей из камеры сгорания, лишь небольшую часть энергии. В результате газовая струя имеет на выходе из турбины высокую скорость и создает реактивную силу тяги.

Успешное использование турбореактивных двигателей в авиации началось в 40-х годах созданием реактивных истребителей, а первый в нашей стране реактивный пассажирский самолет ТУ-104 вышел на линию Москва — Иркутск в 1956 г. (см. цветную вклейку III).

Турбореактивными двигателями оборудованы известные всему миру самолеты ИЛ-62, ТУ-154 и первый в мире сверхзвуковой пассажирский самолет ТУ-144 (рис. 41). Четыре его двигателя общей мощностью $440 \cdot 10^3$ кВт обеспечивают скорость полета $2,5 \cdot 10^3$ км/ч, полетная масса самолета 180 т.

Мощность и сила тяги турбореактивного двигателя может быть значительно увеличена за счет использования режима форсажа. С этой целью в струю горячего газа, выходящего из турбины, впрыскивается топливо. Так как в струе горячего газа, выходящего из турбины, имеется большое количество кислорода, происходит горение топлива. В результате этого процесса, называемого дожиганием, температура, давление и, следовательно, скорость истечения газовой струи повышаются. За счет такого режима работы сила тяги двигателя кратковременно может быть увеличена на 25—30% на малых скоростях и до 70% при больших скоростях полета. Фор-

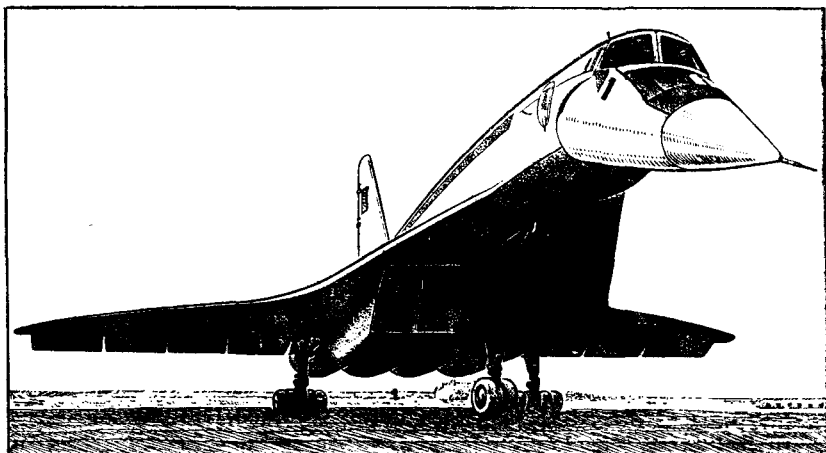


Рис. 41. Первый турбореактивный пассажирский сверхзвуковой самолет ТУ-144

сажными камерами позади турбины обычно оборудуются реактивные двигатели истребителей (см. цветную вклейку III). Имеются такие камеры и у двигателей самолета ТУ-144.

Прямоточный воздушно-реактивный двигатель. Самолетный реактивный двигатель может быть устроен и значительно проще, без компрессора и газовой турбины, так как при большой скорости движения самолета надобность в компрессоре отпадает. Повышения давления воздуха перед камерой сгорания можно добиться выбором формы воздухозаборника и камеры сгорания (рис. 42).

Если площадь поперечного сечения воздушного потока у входа двигателя меньше, чем у камеры сгорания, то скорость движения воздуха в камере сгорания меньше, чем у входа, так как за единицу времени через поперечное сечение двигателя должно проходить одно и то же количество воздуха. Согласно **з а к о н у Б е р н у л л и** в том участке трубы, где скорость движения газа меньше, давление выше.

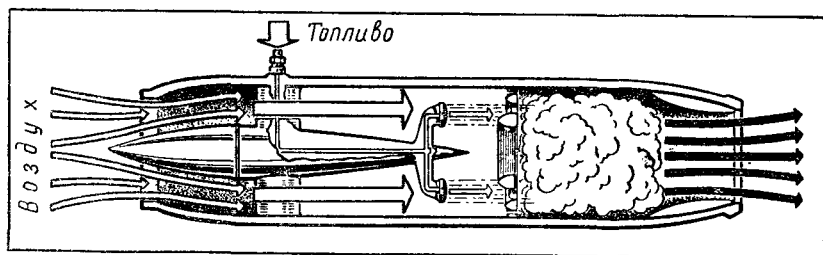


Рис. 42. Прямоточный воздушно-реактивный двигатель

Впрыскивание и сжигание горючего повышает температуру и давление воздуха в камере сгорания, и он выходит из камеры сгорания с большой скоростью. Скорость истечения горячего воздуха и продуктов горения повышается еще и за счет уменьшения площади поперечного сечения отверстия на выходе, поэтому скорость газов v_2 на выходе из двигателя значительно превышает по абсолютной величине скорость движения самолета относительно воздуха v_1 .

Так как скорость воздуха относительно самолета на выходе двигателя равна скорости движения самолета относительно воздуха, то в результате работы реактивного двигателя в системе отсчета, связанной с самолетом, некоторое количество воздуха массой m попадает в двигатель со скоростью v_1 , а выбрасывается из него со скоростью $v_2 > v_1$, следовательно, его импульс изменяется на величину $m(v_2 - v_1)$. Импульс самолета согласно закону сохранения импульса изменяется на величину, равную по абсолютному значению, но противоположную по направлению. Это изменение импульса самолета вызывается реактивной силой отдачи газовой струи.

Реактивные двигатели рассмотренного типа называются **прямоточными воздушно-реактивными двигателями**.

При таких серьезных достоинствах, как простота устройства и малые размеры, широкому применению прямоточных воздушно-реактивных двигателей в авиации препятствует необходимость предварительного разгона самолета с помощью двигателей другого типа. Этого недостатка не имеет пульсирующий воздушно-реактивный двигатель.

Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель. Главное отличие пульсирующего воздушно-реактивного двигателя от прямоточного заключается в применении специальных клапанов в камере сгорания со стороны входа воздуха (рис. 43). Клапаны закрываются, если давление в камере сгорания превышает давление набегающего потока воздуха, и открываются, если давление в камере сгорания становится меньше давления

набегающего потока воздуха. Это позволяет работать без предварительного разгона самолета.

При впрыскивании и поджигании порции топлива температура и давление воздуха в камере сгорания резко повышаются, клапаны со стороны воздухозаборника в это время закрыты. Расширение нагретого воздуха и продуктов горения приводит к выбросу струи горячих газов через открытое сопло.

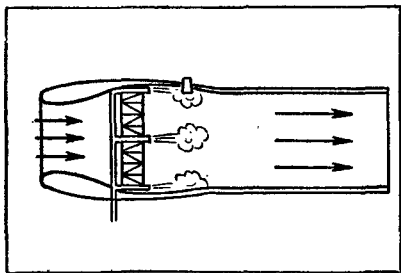


Рис. 43. Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель

ло двигателя и созданию реактивной силы. Так как доступа новым порциям воздуха в камеру сгорания в это время нет и подача топлива прекратилась, горение прекращается и давление в камере сгорания резко уменьшается. Это приводит к открытию клапанов со стороны воздухозаборника и поступлению порции воздуха. В этот момент в камеру впрыскивается горючее. Сжигание новой порции горючего приводит вновь к повышению давления в камере, клапаны на входе закрываются, и происходит выброс порции горячих газов через сопло на выходе, создающий реактивную силу тяги двигателя. Частота пульсаций достигает нескольких тысяч в минуту.

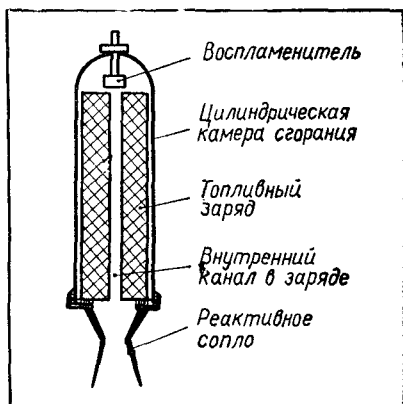


Рис. 44. Реактивный двигатель на твердом топливе

Ракетные двигатели. Реактивные двигатели, не использующие для своей работы окружающую среду, например воздух земной атмосферы, называются ракетными двигателями. Основные части ракетного двигателя — камера сгорания и сопло. В принципе для ракетного двигателя могут быть использованы различные источники энергии, но на практике пока применяются в основном химические ракетные двигатели. Сжигание горючего в камере сгорания химического ракетного двигателя приводит к образованию продуктов горения в газообразном состоянии. Выход струи газа через сопло приводит к возникновению реактивной силы.

Наиболее просто устроены ракетные двигатели, работающие на твердом топливе (РДТТ) (рис. 44). Примером твердого ракетного топлива может служить порох. РДТТ находят применение в военной технике. Ракетные снаряды с РДТТ успешно применялись в годы Великой Отечественной войны на реактивных установках — «катюшах» (рис. 45).

Постоянная готовность РДТТ к работе, простота и надежность позволяют использовать их в баллистических ракетах, которыми вооружены атомные подводные лодки, и в межконтинентальных баллистических ракетах.

Недостатком РДТТ является трудность управления его работой. Значительно удобнее в управлении жидкостные реактивные двигатели (ЖРД). Применение в качестве горючего и окислителя жидких веществ позволяет также получить больший выход энергии на единицу массы топлива и использовать более высокие скорости истечения газовой струи. Если для РДТТ максимальная скорость истечения составляет 2—3 км/с, то у ЖРД она



Рис. 45. Гвардейские минометы «катюши»

может достигать 3—5 км/с. Этими преимуществами ЖРД объясняется широкое их использование в ракетно-космической технике.

Впервые возможность и необходимость использования ЖРД для запуска человека или автоматических устройств в космическое пространство была обоснована Константином Эдуардовичем Циолковским в статье «Исследование мировых пространств реактивными приборами», опубликованной в 1903 г. В этой работе К. Э. Циолковский предложил конструкцию космической ракеты с ЖРД (рис. 46), проанализировал возможности использования различных химических веществ в качестве горючего и окислителей, рассмотрел способы управления полетом ракеты.

Первая советская жидкостная ракета «ГИРД-09» была создана в 1933 г. под руководством Сергея Павловича Королева по проекту М. К. Тихонравова. Двигатель ракеты работал на жидком кислороде и бензине.

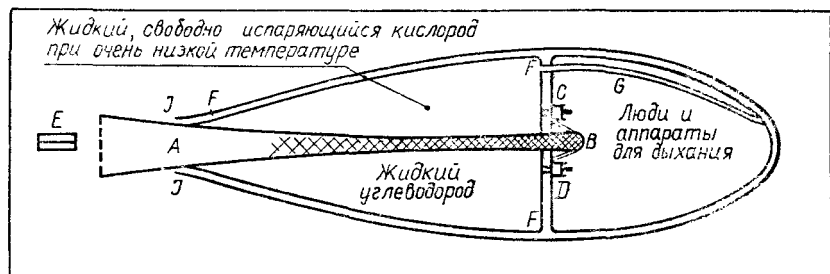
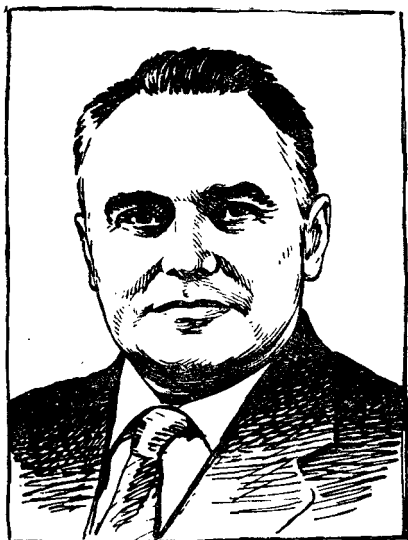


Рис. 46. Конструкция жидкостной ракеты по К. Э. Циолковскому



С. П. Королев



В. П. Глушко

Дальнейшая успешная разработка ракетно-космической техники, выполненная под руководством академика С. П. Королева, позволила осуществить в нашей стране запуск первого в мире искусственного спутника Земли (4 октября 1957 г.), полет вокруг Земли первого в мире космонавта Ю. А. Гагарина (12 апреля 1961 г.), осуществить запуск межпланетных автоматических станций на Луну, Марс, Венеру. Жидкостные реактивные двигатели для советских космических ракет разработаны под руководством академика Валентина Петровича Глушко.

Мощность первой ступени ракеты-носителя «Восток» с ЖРД РД-107 (рис. 47) достигала 15 млн. кВт! Ракета-носитель «Протон», выведшая в космическое пространство советские ИСЗ «Протон» с массой 12,2 т, имеет мощность около 45 млн. кВт! Двигатели этой, космической ракеты развивают мощность, в 7 раз превосходящую мощность крупнейшей в мире Красноярской гидроэлектростанции! Схема устройства жидкостной ракеты представлена на рисунке 48.

Масштабы современной космической техники можно охарактеризовать параметрами ракетных систем, с помощью которых был произведен запуск космических кораблей «Союз» и «Аполлон» в ходе осуществления совместной советско-американской программы. Трехступенчатая ракета-носитель советского космического корабля «Союз» с жидкостно-ракетными двигателями имеет общую длину 49,3 м, максимальный диаметр по стабилизаторам 10,3 м, стартовую массу 330 т.

Американский космический корабль «Аполлон» выводился на орбиту двухступенчатой ракетой-носителем «Сатурн-1В» общей

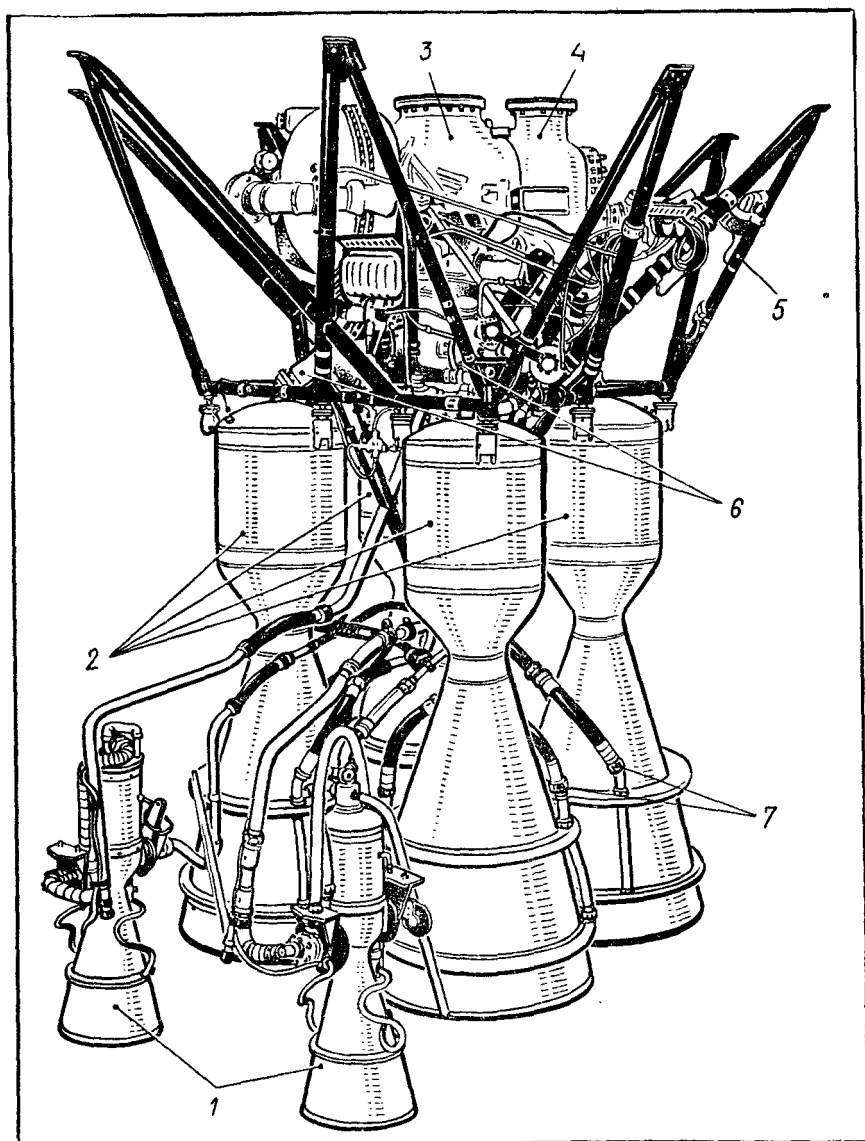


Рис. 47. Ракетный двигатель РД—107:

1 — рулевые камеры сгорания и сопла; 2 — основные камеры сгорания; 3 — насос подачи окислителя; 4 — насос подачи горючего; 5 — силовая рама; 6 — трубопроводы окислителя; 7 — трубопроводы горючего

высотой 68,2 м, с максимальным размахом стабилизирующих поверхностей 12,4 м и массой 587 т.

Интересно отметить, что в некоторых вариантах американской ракеты-носителя «Сатурн» в качестве горючего и окислителя используются, как и предлагал К. Э. Циолковский, жидкий водород и жидкий кислород.

Мощность, сила тяги и КПД ракетного двигателя. Полезную мощность ракетного двигателя можно определить, считая приблизительно, что вся полезная работа его затрачивается на сообщение кинетической энергии струе газов:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{E_k}{t} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m_c v^2}{2},$$

где m — масса газов, выброшенных ракетным двигателем за t секунд, $m_c = \frac{m}{t}$ —

масса газов, выброшенных двигателем за 1 с, v — скорость истечения газов. Это приближение близко к истине в том случае, если масса ракеты много больше массы газов, выбрасываемых двигателем за 1 с, так как тогда изменение кинетической энергии ракеты много меньше кинетической энергии выброшенных газов. За малый интервал времени Δt в результате выброса струи газов импульс ракеты изменяется на величину

$$\Delta p = mv,$$

где m — масса выброшенных газов. Изменение импульса ракеты можно выразить через силу тяги F_T и время действия силы Δt :

$$\Delta p = F_T \cdot \Delta t.$$

Отсюда

$$F_T \cdot \Delta t = mv \text{ и } F_T = \frac{mv}{\Delta t} = m_c v.$$

Тогда между силой тяги F_T и мощностью двигателя N устанавливается связь:

$$N = \frac{F_T v}{2}.$$

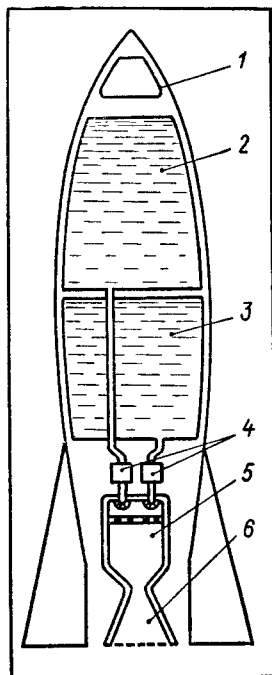


Рис. 48. Схема устройства жидкостной ракеты:

1 — полезный груз; 2 — окислитель; 3 — горючее; 4 — насосы; 5 — камера сгорания; 6 — сопло

КПД ракетного двигателя можно определить как отношение его полезной мощности N к мощности Q_c , выделяемой при сжигании топлива:

$$\eta = \frac{N}{Q_c} = \frac{\frac{m_c v^2}{2}}{m_c q} = \frac{v^2}{2q},$$

где v — скорость истечения газов, q — теплотворная способность ракетного топлива. Здесь следует обратить особое внимание на последнее понятие. Так как в расчетах мы приняли равными секундный расход горючего m_c и секундный выход газов m_c из сопла ракеты, то, следовательно, мы приняли, что m_c — это секундный расход горючего и необходимого количества окислителя. Следовательно, и теплотворная способность q горючего должна определяться как отношение количества тепла Q к массе m горючего и необходимого количества окислителя: $q = \frac{Q}{m}$.

Например, при использовании в качестве ракетного горючего керосина, а в качестве окислителя жидкого кислорода на 1 кг керосина расходуется 2,56 кг кислорода, поэтому теплотворная способность q керосина и кислорода как ракетного топлива и окислителя будет в 3,56 раз меньше, чем теплотворная способность керосина, приводимая обычно в справочных таблицах:

$$q = \frac{46\,200 \text{ кДж}}{3,56 \text{ кг}} \approx 13\,000 \text{ кДж/кг.}$$

Оценим КПД ракетного двигателя, использующего в качестве горючего и окислителя водород и кислород. При образовании 1 кг водяного пара освобождается $1,2 \cdot 10^7$ Дж, скорость истечения продуктов горения 4,2 км/с, поэтому КПД двигателя равен:

$$\eta = \frac{v^2}{2q} = \frac{(4,2 \cdot 10^3 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 1,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}} \approx 0,73; \quad \eta = 73 \%$$

Полученный результат показывает, что КПД ракетного двигателя может превышать КПД всех других видов тепловых машин. Однако не следует забывать, что при больших значениях КПД ракетного двигателя как тепловой машины его применение во многих случаях оказывается экономически нецелесообразным. Хотя он эффективно преобразует внутреннюю энергию горючего в механическую энергию, при малом значении массы выброшенных газов по сравнению с массой ракеты (или другого объекта, разгоняемого ракетным двигателем) большая часть этой механической энергии передается струе истекающих газов, а не ракете.

КПД ракеты, определяемый по кинетической энергии только полезного груза, повышается при увеличении времени работы ракетного двигателя потому, что значительная часть энергии, затраченная, казалось бы, бесполезно на увеличение кинетической энергии горючего и окислителя, передается последующей ступени ракеты при их сжигании.

§ 31. ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Задача 1. В опытах Резерфорда было получено, что в герметичном сосуде, в который помещен 1 г радия, накапливается за год $0,156 \text{ см}^3$ газообразного гелия при нормальных условиях. Исходя из этих данных, определите число Авогадро, если известно, что 1 г радия испускает за 1 с $14,8 \cdot 10^{10}$ α -частиц, т. е. атомов гелия.

Решение. Для определения числа атомов гелия N в объеме $0,156 \text{ см}^3$ необходимо число α -частиц (атомов гелия), испускаемых 1 г радия за 1 с, умножить на число секунд в году:

$$N = 14,8 \cdot 10^{10} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 4,7 \cdot 10^{18}.$$

Из этих данных, используя закон Авогадро, можно получить значение числа Авогадро:

$$\begin{array}{l} N = 4,7 \cdot 10^{18} \\ V = 1,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \\ V_M = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_M}, \quad N_A = \frac{NV_M}{V}; \\ N_A = \frac{4,7 \cdot 10^{18} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3}}{1,56 \cdot 10^{-7}} \approx 6,7 \cdot 10^{23}. \end{array} \right.$$

N_A — ?

Задача 2. Определите радиус атома алюминия, приняв, что в алюминии, находящемся в твердом состоянии, атомы располагаются плотно друг к другу.

Решение. Для решения задачи найдем сначала объем V , занимаемый одним атомом.

Объем V , занимаемый одним атомом алюминия, определится делением объема V_1 , занимаемого 1 молем алюминия, на число атомов алюминия в одном моле N_A :

$$\begin{array}{l} \rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \\ M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \\ N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \end{array} \quad \left| \quad \begin{array}{l} V = \frac{V_1}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A}; \\ V = \frac{27 \cdot 10^{-3}}{2,7 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{23}} \approx 1,7 \cdot 10^{-29} \text{ (м}^3\text{)}. \end{array} \right.$$

r — ?

Длина l ребра куба, занимаемого атомом, равна:

$$l = \sqrt[3]{V}; \quad l = \sqrt[3]{1,7 \cdot 10^{-29}} \approx 2,6 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

Считая атом алюминия шаром, вписанным в этот куб, мы получим, что радиус атома алюминия равен половине ребра этого куба:

$$r = \frac{l}{2} \approx 1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Задача 3. Для того чтобы проверить, насколько близки к истине ваши представления об атмосферном воздухе, попробуйте, не прибегая к вычислениям, оценить массу воздуха, находящегося в физическом кабинете.

Какой объем займет воздух, находящийся в физическом кабинете, если его перевести в жидкое состояние? Поместится ли он тогда в вашу сумку для книг?

После того как вы сделали свои оценки, проверьте их расчетами.

Решение. Определим сначала массу воздуха в кабинете. Для кабинета физики размером $6 \times 12 \times 3$ м получаем объем воздуха, равный $V = 216 \text{ м}^3$.

Принимая среднюю молярную массу воздуха равной $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \times \times \text{ моль}^{-1}$, найдем массу воздуха в кабинете при температуре 20°C :

$\begin{aligned} \rho &= 10^5 \text{ Па} \\ V &= 216 \text{ м}^3 \\ M &= 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{ моль}^{-1} \\ T &= 293 \text{ К} \\ R &= 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{ К}^{-1} \cdot \text{ моль}^{-1} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \rho V &= \frac{m}{M} RT; \\ m &= \frac{\rho VM}{RT}; \\ m &= \frac{10^5 \cdot 216 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 293} \approx 260 \text{ (кг)}. \end{aligned}$
$m = ? \quad V = ?$	

Так как плотность воздуха в жидком состоянии равна $\rho = 873 \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}$, то в жидком состоянии объем воздуха физического кабинета равен: $V = \frac{m}{\rho}$, $V = \frac{260}{873} \approx 0,3 \text{ (м}^3\text{)}$.

Задача 4. Оцените, во сколько раз изменится расстояние между молекулами при переходе воды из жидкого в газообразное состояние.

Решение. Очевидно, на этот вопрос не может быть дан однозначный ответ, так как объем, занимаемый газом, определяется только размерами сосуда. Для примера сравним воду и водяной пар при нормальном атмосферном давлении. Вычислим, какой объем V_1 приходится на долю одной молекулы воды в жидком состоянии. Для этого разделим объем V , занимаемый одним молем воды, на число молекул в одном моле, т. е. на число Авогадро N_A :

$$V_1 = \frac{V}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A}; \quad V_1 = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot 6 \cdot 10^{23}} = 3 \cdot 10^{-29} \text{ (м}^3\text{)}.$$

Подчеркнем, что полученное число не есть объем молекулы воды, это объем условной кубической ячейки, занимаемой одной молекулой. Все такие кубические ячейки без зазоров примыкают одна к другой. Ребро куба l_1 объемом V_1 равно диаметру молекулы, если ее считать шаром, вписанным в эту кубическую ячейку, или расстоянию между центрами соседних молекул d_1 . Это расстояние можно определить, найдя длину ребра куба l_1 , имеющего объем V_1 :

$$d_1 = l_1 = \sqrt[3]{V_1}; \quad d_1 \approx \sqrt[3]{3 \cdot 10^{-29}} \approx 3 \cdot 10^{-10} \text{ (м)}.$$

Рассмотрим теперь водяной пар при нормальном атмосферном давлении и температуре 100°C . Объем, занимаемый молем водяного пара при этих условиях, можно определить, воспользовавшись уравнением Клапейрона — Менделеева:

$$\begin{aligned} p &= 10^6 \text{ Па} \\ T &= 373 \text{ К} \\ R &= 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1} \end{aligned}$$

$V = ?$

$$\left. \begin{aligned} pV &= RT; \\ V &= \frac{RT}{p}; \\ V &= \frac{8,31 \cdot 373}{10^6} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ (м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}\text{)}. \end{aligned} \right\}$$

Разделив молярный объем водяного пара при атмосферном давлении V на число Авогадро N_A , получим объем V_2 , приходящийся на долю одной молекулы водяного пара при этих условиях:

$$V_2 = \frac{V}{N_A}; \quad V_2 = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{6 \cdot 10^{23}} = 5 \cdot 10^{-26} \text{ (м}^3\text{)}.$$

Если представить себе, что на какое-то мгновение хаос в расположении молекул водяного пара сменился порядком и каждая из них находится в центре кубической ячейки, то расстояние между соседними молекулами d_2 определится бы выражением:

$$d_2 = l_2 = \sqrt[3]{V_2}; \quad d_2 = \sqrt[3]{5 \cdot 10^{-26}} \approx 3,7 \cdot 10^{-9} \text{ (м)}.$$

Для реального газа, состоящего из хаотически движущихся молекул, величина d_2 имеет смысл среднего расстояния между молекулами.

Получив численные характеристики распределения в пространстве молекул вещества в жидком и газообразном состояниях, сравним их между собой:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{5 \cdot 10^{-26}}{3 \cdot 10^{-29}} \approx 1700; \quad \frac{d_2}{d_1} = \frac{3,7 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^{-10}} \approx 12.$$

Наши расчеты показывают, что при переходе воды из жидкого состояния в газообразное при условиях, близких к нормальным, объем, приходящийся на долю одной молекулы, увеличивается почти в 2000 раз. Однако среднее расстояние между молекулами при этих условиях изменяется не так значительно, примерно в 12 раз.

Задача 5. Основываясь на представлении молекулярно-кинетической теории, оцените давление и температуру внутри Солнца. Масса Солнца $2 \cdot 10^{30}$ кг, радиус $7 \cdot 10^8$ м. В расчетах можно принять, что Солнце состоит в основном из атомарного водорода.

Решение. Согласно молекулярно-кинетической теории давление газа p связано с его температурой T и концентрацией молекул n соотношением $p = nkT$, отсюда

$$T = \frac{p}{nk}$$

Поскольку Солнце не расширяется и не сжимается, на любой глубине давление его внутренних слоев равно давлению вышележащих слоев, создаваемому действием силы тяжести F :

$$p = \frac{F}{S}.$$

Отсюда следует, что для определения температуры на какой-то глубине внутри Солнца необходимо определить концентрацию атомов n на этой глубине и давление вышележащих слоев p .

Для упрощения зададимся целью определить температуру на расстоянии $R/2$ от центра Солнца, где концентрацию атомов водорода можно считать приближенно равной среднему значению для Солнца:

$$n \approx n_{\text{ср}} = \frac{N}{V} = \frac{M_C N_A}{M V} = \frac{M_C N_A}{M \cdot \frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{\rho N_A}{M}.$$

Выделив вертикальный столб газа с площадью основания S , давление верхних слоев на лежащие ниже можно оценить, пренебрегая зависимостью плотности ρ газа от глубины. Примем расстояние до центра масс верхней половины столба газа равным $3/4 R$ и произведем расчет силы тяготения, пренебрегая отличием формы тяготеющих тел от точечных и шарообразных тел:

$$F = \gamma \frac{m M_C}{\left(\frac{3}{4} R\right)^2} = \gamma \frac{\rho \cdot \frac{R}{2} S M_C}{\left(\frac{3}{4} R\right)^2 R^3} = \gamma \frac{\rho S M_C}{\frac{9}{8} R}.$$

Тогда давление будет равно:

$$p = \frac{F}{S} = \gamma \frac{\rho M_C}{\frac{9}{8} R} = \gamma \frac{M_C^2}{\frac{9}{8} R \cdot \frac{4}{3} \pi R^3} = \gamma \frac{M_C^2}{\frac{3}{2} \pi R^4},$$

а температура:

$$T = \frac{p}{nk} = \frac{\gamma \rho M_C M}{\frac{9}{8} R \rho N_A k} = \frac{\gamma M_C M}{\frac{9}{8} R N_A k}.$$

Получим численные значения давления и температуры:

$$p = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot (2 \cdot 10^{30})^2}{3/2 \pi (7 \cdot 10^8)^4} \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ (Па);}$$

$$T = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 2 \cdot 10^{30} \cdot 10^{-3}}{\frac{9}{8} \cdot 7 \cdot 10^8 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ (К)}.$$

Мы получили, что в недрах Солнца давление газа примерно в 20 млрд. раз превышает нормальное атмосферное давление, а температура составляет около 20 млн. К. При всей приблизительности расчетов результаты весьма близки к полученным более строгим путем.

Задача 6. На рисунке 49 представлен график процесса изменения состояния идеального газа. Уменьшился или увеличился объем газа при переходе из состояния 1 в состояние 2? Масса газа постоянна.

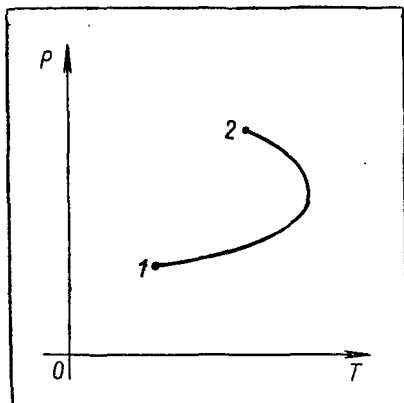


Рис. 49. К задаче 6

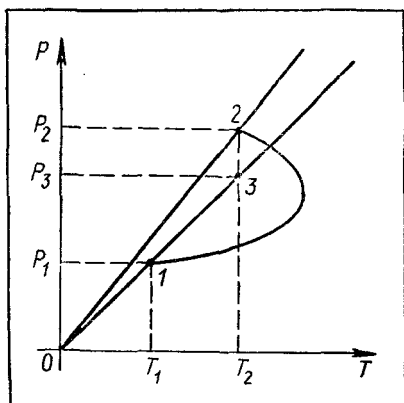


Рис. 50. К решению задачи 6

Решение. Проведем прямые из начала координат через точки 1 и 2 (рис. 50). Эти прямые являются графиками изохорических процессов для газа при значениях объемов V_1 и V_2 . Согласно уравнению состояния идеального газа для состояний 1 и 2 можно записать уравнение:

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

Выделив на нижней изохоре, соответствующей постоянному объему газа V_1 , точку 3, соответствующую температуре T_2 , можно записать еще одно уравнение для третьего состояния газа:

$$\frac{p_3 V_1}{T_2} = \frac{p_2 V_2}{T_2}, \text{ или } p_3 V_1 = p_2 V_2.$$

Как видно из рисунка 50, $p_3 < p_2$. Следовательно, $V_1 > V_2$.

Задача 7. В сосуде объемом $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ находится 1 кг воды и $28 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$ азота. Каково давление в сосуде при температуре 373 К?

Решение.

$$\begin{aligned} m_1 &= 1 \text{ кг} \\ M_1 &= 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \\ m_2 &= 28 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \\ M_2 &= 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \\ V_1 &= 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ T &= 373 \text{ К} \end{aligned}$$

$p = p_1 + p_2$. При температуре 373 К давление насыщенного водяного пара p_1 равно $\approx 10^5 \text{ Па}$. Для нахождения давления азота необходимо знать объем, оставшийся в сосуде, не занятым жидкой водой.

$p = ?$

Так как масса воды в газообразном состоянии в объеме $5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при температуре 373 К пренебрежимо мала по сравнению с массой воды в жидком состоянии, можно считать, что вода в жидком состоянии занимает объем $V_2 = 10^{-3} \text{ м}^3$. Тогда пары воды и азот за-

нимают объем $V = V_1 - V_2$; $V = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 10^{-3} \text{ м}^3 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.
Следовательно,

$$\rho_2 V = \frac{m_2}{M_2} RT; \quad \rho_2 = \frac{m_2 RT}{M_2 V};$$

$$\rho_2 = \frac{28 \cdot 10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 373}{28 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-3}} \approx 8 \cdot 10^5 \text{ (Па)};$$

$$\rho = \rho_1 + \rho_2; \quad \rho = 10^5 \text{ Па} + 8 \cdot 10^5 \text{ Па} = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Задача 8. Вычислите площадь поверхности молекул, находящихся в 1 м^3 воздуха при температуре 20°C , среднюю длину свободного пробега молекулы и число столкновений за 1 с .

Решение.

$$\begin{aligned} V &= 1 \text{ м}^3 \\ \rho &= 10^5 \text{ Па} \\ T &= 293 \text{ К} \\ r &= 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ м} \\ M &= 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= 4\pi r^2 n; \quad p = nkT; \\ n &= \frac{p}{kT}, \quad S = \frac{4\pi r^2 p}{kT}; \\ S &= \frac{4\pi (1,5)^2 \cdot 10^{-20} \cdot 10^5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293} \approx 7 \cdot 10^6 \text{ (м}^2\text{)}. \end{aligned}$$

$S - ? \quad \lambda - ? \quad v - ?$

$$\lambda = \frac{1}{4\pi r^2 n} = \frac{1}{S}; \quad \lambda = \frac{1}{7 \cdot 10^6} \approx 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ (м)};$$

$$v = 4\pi r^2 n \bar{v} \approx 4\pi r^2 n \sqrt{\frac{3RT}{M}};$$

$$v = 7 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{3 \cdot 8,31 \cdot 293}{29 \cdot 10^{-3}}} \approx 3,5 \cdot 10^9 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Мы получили, что площадь поверхности всех молекул, заключенных в 1 м^3 воздуха при нормальных условиях, составляет почти 10 млн. м^2 , средняя длина свободного пробега молекулы равна примерно одной десятиллионной доле метра, а число столкновений молекулы за одну секунду достигают примерно $3,5$ миллиардов.

Задача 9. Определите число элементарных ячеек в 1 см^3 свинца. Кристаллическая решетка свинца гранцентрированная кубическая.

Решение. Как видно из рисунка 16, в, одной элементарной ячейке гранцентрированной кубической решетки принадлежит $n_0 = = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$ атома.

Число элементарных ячеек n в 1 см^3 можно определить, разделив число атомов N свинца, содержащихся в этом объеме, на число атомов свинца n_0 , содержащихся в одной элементарной ячейке.

$$\begin{aligned} V &= 10^{-6} \text{ м}^3 \\ \rho &= 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \\ n_0 &= 4 \\ N_A &= 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \\ M &= 207 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{N}{n_0}, \quad N = \frac{m N_A}{M} = \frac{V \rho N_A}{M}, \\ n &= \frac{V \rho N_A}{M n_0}, \\ n &= \frac{10^{-6} \text{ м}^3 \cdot 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{207 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot 4} = \\ &= 6,6 \cdot 10^{21}. \end{aligned}$$

$n - ?$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 10. Для осуществления физического эксперимента необходимо разогреть в замкнутом сосуде водород до температуры $2 \cdot 10^8$ К. Какова максимальная допустимая концентрация атомов водорода в сосуде, если его стенки могут выдержать давление 10^6 Па? Каким будет давление водорода при нормальных условиях?

Задача 11. Температура атмосферы Солнца — фотосферы — равна 6000 К, концентрация атомов составляет примерно 10^{25} частиц в 1 см^3 . Предполагая, что Солнце состоит в основном из атомарного водорода, определите давление и плотность солнечной атмосферы.

Задача 12. На рисунке 51 представлен график процесса изменения состояния идеального газа. Уменьшилось или увеличилось давление газа при переходе из состояния 1 в состояние 2?

Задача 13. На рисунке 52 представлены графики изохорических процессов изменения состояния газов с одинаковой молярной массой. Почему графики 1 и 2 не совпадают?

Задача 14. На рисунке 53 представлены графики изобарических процессов изменения состояния газов с одинаковой массой, но различными молярными массами M_1 и M_2 . Определите по графикам соотношения между M_1 и M_2 .

Задача 15. Температура атмосферного воздуха в средних широтах изменяется со временем года. Считая объем атмосферы примерно постоянным, можно оценить изменения давления воздуха.

Приняв, что температура воздуха изменяется от $+27^\circ\text{C}$ летом до -23°C зимой, мы получим, что давление атмосферного воздуха летом должно превышать атмосферное давление зимой примерно на 20%.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{300 \text{ К}}{250 \text{ К}} = 1,2.$$

Аналогично следует ожидать и суточных колебаний давления вследствие различия дневной и ночной температур воздуха.

В действительности таких значительных колебаний атмосферного давления воздуха не наблюдается. Почему?

Задача 16. Воздушный шар объемом 240 м^3 при заполнении водородом при температуре 300 К поднимает полезный груз 300 кг. Какой полезный груз он сможет поднять при заполнении горячим воздухом при температуре 400 К?

До какой температуры потребовалось бы нагреть воздух, чтобы он мог поднять такой же полезный груз, как и при заполнении водородом?

Задача 17. В межзвездном пространстве имеется газообразный атомарный водород. Его концентрация составляет примерно 1 атом в 1 см^3 , температура примерно 125 К. Вычислите давление межзвездного газа, длину свободного пробега и интервал времени между двумя столкновениями молекул. Радиус атома водорода равен $5 \cdot 10^{-11} \text{ м}$.

Задача 18. Оцените, каким должно быть давление в сосуде, для того чтобы длина свободного пробега молекул азота в нем была равна 1 м при температуре 0°C .

Задача 19. Во сколько раз изменится число столкновений молекул газа при увеличении давления в два раза? Температура газа остается постоянной.

Задача 20. При вакуумной откачке сосуда, представляющего собой куб с длиной ребра 1 м, не были приняты меры для удаления молекул газа, адсорбированных на его внутренней поверхности. Найдите длину свободного пробега молекул газа, если все адсорбированные молекулы покинут стенки сосуда. Слой считать мономолекулярным, диаметр молекул принять равным 10^{-10} м .

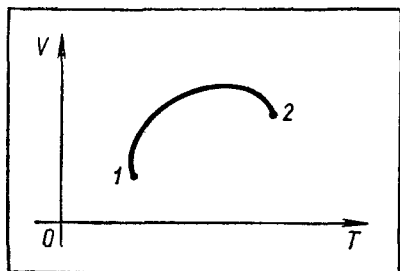


Рис. 51. К задаче 12

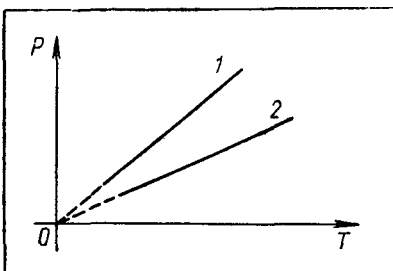


Рис. 52. К задаче 13

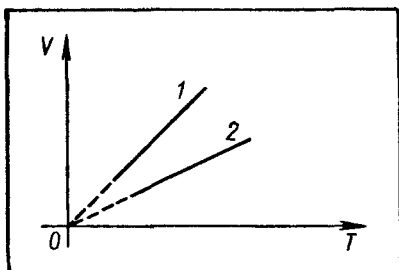


Рис. 53. К задаче 14

Задача 21. Предел прочности на сжатие кирпича $1,5 \cdot 10^7$ Н/м², бетона $6 \cdot 10^7$ Н/м²; плотность кирпича $1,8 \cdot 10^3$ кг/м³, бетона $2,2 \times 10^3$ кг/м³. Подсчитайте, какова предельная высота стены, которую можно построить из кирпича и из бетона при коэффициенте запаса прочности $k = 6$.

Задача 22. К медной проволоке длиной 1 м и радиусом 1 мм подвесили груз массой 100 кг. Чему равна работа растяжения проволоки?

ТЕРМОДИНАМИКА

Задача 23. Цилиндр длиной 11 см заполнен воздухом при нормальных условиях. Используя молекулярно-кинетическую теорию, оцените повышение температуры воздуха в цилиндре при сжатии воздуха, если поршень двигался со скоростью 1 м/с и переместился на 10 см.

Решение. При одном упругом столкновении с поршнем скорость v_1 молекулы газа увеличивается на $\Delta v_1 = 2v_2$, где v_2 — скорость движения поршня. Оценим изменение температуры газа при условии, что все его молекулы испытали по одному столкновению с поршнем:

$$\frac{3}{2} k\Delta T = \Delta E = \frac{m(v_1 + \Delta v_1)^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = mv_1 \cdot \Delta v_1 + \frac{m(\Delta v_1)^2}{2}.$$

Так как $v_1 \gg \Delta v_1$, то второе слагаемое можно считать пренебрежимо малым, тогда

$$\frac{3}{2} k\Delta T \approx mv_1 \cdot \Delta v_1,$$

откуда

$$\Delta T = \frac{mv_1 \cdot \Delta v_1 \cdot 2}{3k} = \frac{4mv_1v_2}{3k}.$$

Для получения количественного результата используем исходные данные:

$$\begin{aligned} T &= 293 \text{ К} \\ v_2 &= 1 \text{ м/с} \\ M &= 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \\ l &= 0,11 \text{ м} \end{aligned}$$

$\Delta T = ?$

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{4mv_1v_2}{3k}; \quad v_1 = \sqrt{\frac{3kT}{m}}; \\ \Delta T &= \frac{4mv_2\sqrt{3kT}}{3k\sqrt{m}} = \frac{4v_2\sqrt{Tm}}{\sqrt{3k}} = \\ &= \frac{4v_2\sqrt{TM}}{\sqrt{3kN_A}}; \\ \Delta T &= \frac{4 \cdot 1 \cdot \sqrt{293 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}}{\sqrt{3 \cdot 8,31}} \approx 2,3 \text{ (К)}. \end{aligned}$$

Для определения изменения температуры газа при перемещении поршня на 10 см нужно подсчитать число столкновений молекул с поршнем за время его движения. Приблизительно это число можно определить, зная среднюю скорость движения поршня v_2 и длину пройденного им пути l . Длительность интервала времени, в течение которого двигался поршень:

$$\Delta t = \frac{l}{v_2}; \quad \Delta t = \frac{0,1}{1} = 0,1 \text{ (с)}.$$

Так как средняя скорость теплового движения молекулы в атмосферном воздухе при температуре 293 К равна примерно 500 м/с, за 0,1 с она проходит путь, равный

$$s = v_2 \cdot \Delta t; \quad s = 500 \cdot 0,1 = 50 \text{ (м)}.$$

Если принять, что молекула движется в направлении, перпендикулярном поверхности поршня, и не испытывает столкновений с другими молекулами, то в начале интервала времени Δt от одного столкновения с поршнем до второго она проходила путь, равный $l_1 = 0,22$ м, а в конце интервала времени Δt этот путь сокращается до $l_2 = 0,02$ м. Поэтому примем среднюю длину пути $l_{\text{ср}}$ молекулы между двумя столкновениями с поршнем равной

$$l_{\text{ср}} = \frac{l_1 + l_2}{2}; \quad l_{\text{ср}} = \frac{0,22 + 0,02}{2} = 0,12 \text{ (м)}.$$

Тогда число столкновений молекулы с поршнем n за время его движения Δt равно:

$$n = \frac{s}{l_{\text{ср}}} = \frac{50}{0,12} \approx 400.$$

Увеличение температуры газа после 400 столкновений его молекул с поршнем должно быть равно:

$$n \cdot \Delta T \approx 400 \cdot 2,3 \text{ К} \approx 920 \text{ К}.$$

Таким образом, мы получили качественное объяснение результатов опыта (см. с. 47) с помощью молекулярно-кинетической теории, так как увеличения температуры воздуха на 920 К вполне достаточно для зажигания ваты в «воздушном огне».

Задача 24. Вычислите работу, совершаемую одним молем идеального газа при нагревании его на 1 К при постоянном давлении.

Решение

$$\begin{aligned} m &= M \\ T &= 1 \text{ К} \\ p &= \text{const} \end{aligned}$$

$$A = ?$$

$$A = p \cdot \Delta V; \quad pV = \frac{m}{M} RT;$$

$$p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} R \cdot \Delta T;$$

$$A = \frac{pmR \cdot \Delta T}{Mp} = \frac{mR \cdot \Delta T}{M}.$$

$$\text{При } m = M \text{ и } \Delta T = 1 \text{ К } A = R.$$

Мы получили, что при нагревании на 1 К при постоянном давлении 1 моль идеального газа совершает работу, численно равную молярной газовой постоянной R .

Задача 25. Удельная теплоемкость кислорода при постоянном давлении равна $9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$. Определите удельную теплоемкость кислорода при постоянном объеме.

Решение

$$\begin{aligned} c_p &= 9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \\ M &= 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \end{aligned}$$

$$c_v = ?$$

$$c_p = c_v + \frac{A'}{m \cdot \Delta T}; \quad c_v = c_p - \frac{A'}{m \cdot \Delta T};$$

$$A' = p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} R \cdot \Delta T;$$

$$c_v = c_p - \frac{mR \cdot \Delta T}{mM \cdot \Delta T} = c_p - \frac{R}{M};$$

$$\begin{aligned} c_v &= 9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} - \frac{8,31}{32 \cdot 10^{-3}} \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} = \\ &= 6,5 \cdot 10^2 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}. \end{aligned}$$

Задача 26. В квартире объемом 100 м^3 израсходовано количество теплоты 10^6 Дж на нагревание воздуха. Определите изменения внутренней энергии и температуры воздуха в квартире. Начальная температура воздуха в комнате $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение. Согласно первому закону термодинамики изменение внутренней энергии ΔU воздуха равно разности переданного ему количества теплоты Q и работы A' , совершенной воздухом:

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

Так как квартира негерметична, нагревание воздуха в ней происходит при постоянном давлении. Для нахождения работы A' , совершенной воздухом при нагревании, воспользуемся уравнением состояния идеального газа и выражением, определяющим работу газа при изобарическом процессе:

$$pV = \frac{m}{M} RT; \quad p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} R \cdot \Delta T;$$

$$A' = p \cdot \Delta V = \frac{m}{M} R \cdot \Delta T.$$

Для нахождения изменения температуры ΔT воздуха воспользуемся уравнением теплового баланса: $Q = mc_p \cdot \Delta T$. Тогда

$$\Delta T = \frac{Q}{mc_p} \quad \text{и}$$

$$A' = \frac{mRQ}{Mmc_p} = \frac{RQ}{Mc_p}$$

Используя данные задачи, получим:

$$V = 100 \text{ м}^3$$

$$Q = 10^8 \text{ Дж}$$

$$T_1 = 293 \text{ К}$$

$$c_p = 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

$$M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$$

$$\rho = 1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

$$\Delta U = Q - A';$$

$$A' = \frac{8,31 \cdot 10^8}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3} \approx 2,9 \cdot 10^8 \text{ (Дж)}.$$

Далее казалось бы:

$$\Delta U = 10^8 \text{ Дж} - 2,9 \cdot 10^8 \text{ Дж} =$$

$$= 7,1 \cdot 10^5 \text{ Дж};$$

$$\Delta T = \frac{Q}{mc_p} = \frac{Q}{\rho V c_p};$$

$$\Delta T = \frac{10^8}{1,29 \cdot 100 \cdot 10^3} = 8 \text{ (К)}.$$

$$\Delta U \text{ — ? } \quad \Delta T \text{ — ?}$$

Однако в действительности близким к истине при таком способе оказывается лишь расчет изменения температуры воздуха, а расчет изменения внутренней энергии в принципе неверен.

В задаче требуется определить увеличение внутренней энергии воздуха, находящегося в квартире. Часть воздуха при нагревании вышла из квартиры, и при расчете это изменение массы воздуха необходимо учитывать.

Произведем расчет другим способом. Считая воздух идеальным двухатомным газом, изменение внутренней энергии воздуха в квартире найдем как разность внутренней энергии U_2 воздуха после нагревания и U_1 до нагревания:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{5}{2} kT_2 N_2 - \frac{5}{2} kT_1 N_1.$$

Число молекул воздуха N_1 до нагревания и N_2 после нагревания найдем, используя уравнение состояния идеального газа:

$$N_1 = \frac{m_1}{M} N_A; \quad m_1 = \frac{\rho V M}{RT_1};$$

$$N_1 = \frac{\rho V M N_A}{MRT_1} = \frac{\rho V}{kT_1};$$

$$U_1 = \frac{5}{2} kT_1 \frac{\rho V}{kT_1} = \frac{5}{2} \rho V.$$

Аналогично можно получить:

$$U_2 = \frac{5}{2} \rho V.$$

Следовательно, при постоянном объеме и давлении внутренняя энергия идеального газа остается постоянной при любых измене-

ниях температуры газа. Этот парадоксальный результат является следствием того, что давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии молекул \bar{E} и их концентрации n :

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E},$$

т. е. прямо пропорционально кинетической энергии молекул в единице объема газа.

Так как кинетическая энергия молекул в единице объема при постоянном давлении идеального газа остается постоянной, то и внутренняя энергия всего газа в сосуде постоянного объема при постоянном давлении остается одинаковой при любой температуре. Характерно этот результат можно объяснить тем, что при нагревании идеального газа при постоянном давлении увеличение его внутренней энергии за счет повышения температуры в сосуде постоянного объема в точности равно уменьшению внутренней энергии за счет выхода части молекул газа из сосуда.

Задача 27. Одним из способов получения высоких температур является адиабатическое сжатие газов. Для этого можно воспользоваться, например, толстостенным цилиндром, закрытым с обеих сторон, с перемещающимся в нем поршнем. По одну сторону от поршня помещается пороховой заряд, а по другую — газ. При взрыве пороха поршень «выстреливается» и производит адиабатическое сжатие газа в трубе.

Вычислите максимальное нагревание 2 г водорода при сжатии таким образом, если пороховой заряд сообщает поршню массой 10 кг начальную скорость 1 км/с.

Решение

$$\begin{aligned} m_1 &= 10 \text{ кг} \\ m_2 &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \\ M &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \\ v_1 &= 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \end{aligned}$$

$\Delta T = ?$

$$\Delta U = A + Q; \quad A = \frac{mv^2}{2}; \quad Q = 0;$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} k \cdot \Delta T \cdot N; \quad \frac{5}{2} k \cdot \Delta T \cdot N = \frac{mv^2}{2};$$

$$\Delta T = \frac{mv^2}{5kN}; \quad N = \frac{m_2 N_A}{M};$$

$$\Delta T = \frac{mv^2 M}{5k m_2 N_A} = \frac{mv^2 M}{5m_2 R};$$

$$\Delta T = \frac{10 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31} \approx 2,4 \cdot 10^5 \text{ (K)}.$$

Полученный результат представляет собой лишь оценку изменения температуры водорода, так как в расчетах не учитывались такие явления, как распад молекул и ионизация атомов водорода при высоких температурах.

Задача 28. Кабина космического корабля объемом 20 м³ заполнена кислородом при температуре 20° С и давлении 2 · 10⁴ Па. Сколько времени может пребывать космонавт массой 70 кг в этой

кабине, если перестанут работать системы, обеспечивающие постоянство состава искусственной атмосферы, ее температуры и давления? Кабину корабля можно считать теплоизолированной.

Приблизительные данные о жизнедеятельности человеческого организма: суточное потребление кислорода — 1 кг,
суточное потребление энергии — 10^7 Дж.

Решение. Оценим сначала массу кислорода в кабине космического корабля.

$$\begin{aligned} V &= 20 \text{ м}^3 \\ p &= 2 \cdot 10^4 \text{ Па} \\ M &= 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \\ T &= 293 \text{ К} \end{aligned}$$

$m = ?$

$$\begin{aligned} pV &= \frac{m}{M} RT; \\ m &= \frac{pVM}{RT}; \\ m &= \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 20 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 293} \approx 5,3 \text{ (кг)}. \end{aligned}$$

Расчет показывает, что запаса кислорода в кабине достаточно более чем на 5 сут. Оценим теперь время, в течение которого тепло, выделяемое в процессе жизнедеятельности человеческого организма, вызовет нагревание атмосферы в кабине от 20 до 37 °С. В расчете будем сначала полагать, что вся потребляемая человеческим организмом энергия расходуется на нагревание атмосферы корабля.

$$\begin{aligned} P &= 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{сут}^{-1} \approx \\ &\approx 7 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{мин}^{-1} \\ m &= 5,3 \text{ кг} \\ c_V &= 6,5 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \\ \Delta T &= 17 \text{ К} \end{aligned}$$

$t = ?$

$$\begin{aligned} t &= \frac{Q}{P} = \frac{mc_V \Delta T}{P}; \\ t &= \frac{5,3 \cdot 6,5 \cdot 10^3 \cdot 17}{7 \cdot 10^3} \approx 8 \text{ (мин)}. \end{aligned}$$

Далее теплопередачу атмосфере можно не учитывать, так как масса тела космонавта значительно больше массы атмосферы в корабле. Приняв за максимально допустимое значение температуры тела космонавта 42 °С, произведем расчет, учитывая лишь нагревание тела космонавта. Удельную теплоемкость тела человека примем равной удельной теплоемкости воды:

$$\begin{aligned} P &= 10^7 \cdot \text{Дж} \cdot \text{сут}^{-1} \approx \\ &\approx 7 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{мин}^{-1} \\ Q &= 10^8 \text{ Дж} \\ m_K &= 70 \text{ кг} \\ c_K &= 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1} \\ \Delta T &= 5 \text{ К} \end{aligned}$$

$t = ?$

$$\begin{aligned} t &= \frac{Q}{P} = \frac{m_K c_K \Delta T}{P}; \\ t &= \frac{70 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 5}{7 \cdot 10^3} = 210 \text{ (мин)} = 3,5 \text{ (ч)}. \end{aligned}$$

Такое изменение температуры тела лежит за пределами биологических возможностей человека. Полученный результат показывает, что система терморегулирования в космическом корабле играет очень важную роль, без нее длительное существование человека в замкнутом теплоизолированном пространстве малого объема невозможно.

Задача 29. В цилиндре тепловой машины заключен один моль одноатомного идеального газа. Определите КПД тепловой машины, если изменение состояния газа в цилиндре осуществляется по циклу, представленному на рисунке 54.

Решение

$$m = M$$

$$c_V = 3/2 \frac{R}{M}$$

$$\eta = ?$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

$$Q_1 = Q_{AB} + Q_{BC} = mc_V(T_B - T_A) + mc_V(T_C - T_B) + 2p_0V_0$$

$$Q_2 = mc_V(T_C - T_D) + mc_V(T_D - T_A) + p_0V_0$$

$$\eta = \frac{mc_V(T_B - T_A) + 2p_0V_0 - mc_V(T_C - T_A) - p_0V_0}{mc_V(T_C - T_A) + p_0V_0} = \frac{p_0V_0}{mc_V(T_C - T_A) + p_0V_0}$$

Из уравнения Клапейрона—Менделеева для состояний A и B получим:

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B}, \text{ или } \frac{p_0 V_0}{T_A} = \frac{2p_0 V_0}{T_B}$$

$$T_B = 2T_A.$$

Далее аналогично получим для состояний B и C :

$$\frac{p_B V_B}{T_B} = \frac{p_C V_C}{T_C}; \quad \frac{2p_0 V_0}{T_B} = \frac{2p_0 \cdot 2V_0}{T_C}$$

$$T_C = 2T_B = 4T_A.$$

Обозначив $T_A = T_0$, подставим найденные значения T_B и T_C в выражение для КПД:

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{mc_V(4T_0 - T_0) + p_0 V_0}$$

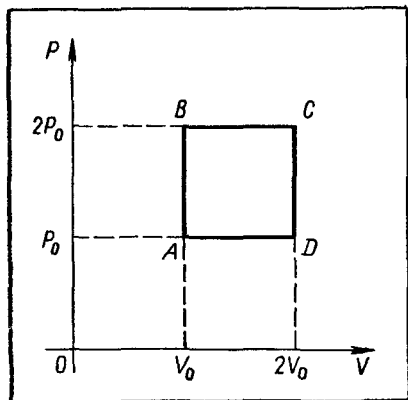


Рис. 54. К задаче 29

Так как $m = M$, $c_V = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$ и

$$p_0 V_0 = RT_0,$$

получаем:

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{M \cdot \frac{3}{2} \frac{R}{M} \cdot 3T_0 + p_0 V_0} = \frac{p_0 V_0}{\frac{9}{2} p_0 V_0 + p_0 V_0} = \frac{2p_0 V_0}{11p_0 V_0} \approx 0,18.$$

Задача 30. Первая ступень американской ракеты-носителя «Сатурн-5», которая использовалась для запуска космических кораблей «Аполлон» на Луну,

имеет пять жидкостных ракетных двигателей. Эти пять двигателей расходуют $2,7 \cdot 10^3$ кг горючего и окислителя в секунду, выбрасывая продукты сгорания со скоростью $2,55 \cdot 10^3$ м·с⁻¹. Масса космической ракеты на старте равна $2,9 \cdot 10^6$ кг, из них примерно $2,5 \cdot 10^6$ кг приходится на горючее и окислитель.

Вычислите силу тяги двигателей первой ступени ракеты и КПД ракеты как тепловой машины. Рассматривая ракету как машину для разгона космического корабля, масса которого равна $4 \cdot 10^4$ кг, оцените ее КПД через 1 с после начала работы двигателей и в конце работы двигателей, когда космический корабль достигает скорости $11,2$ км·с⁻¹.

Теплотворная способность на 1 кг горючего и окислителя для двигателей всех ступеней ракеты примерно одинакова и равна $1,3 \cdot 10^7$ Дж·кг⁻¹.

Решение

$$m_p = 2,9 \cdot 10^6 \text{ кг}$$

$$m_k = 4 \cdot 10^4 \text{ кг}$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 1,35 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$v = 2,55 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$q = 1,3 \cdot 10^7 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$$

$$v_k = 11,2 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

$$m_r = 2,5 \cdot 10^6 \text{ кг}$$

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v;$$

$$F = 1,35 \cdot 10^4 \cdot 2,55 \cdot 10^3 \approx \approx 3,45 \cdot 10^7 \text{ (Н)};$$

$$\eta = \frac{v^2}{2q};$$

$$\eta = \frac{(2,55 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^7} \approx 0,25.$$

$$F - ? \quad \eta - ? \quad \eta_1 - ? \quad \eta_2 - ?$$

При оценке КПД ракеты как машины для разгона космического корабля полезная работа равна кинетической энергии космического корабля. Скорость космического корабля через 1 с после начала работы двигателей первой ступени можно найти, считая, что в течение 1 с масса ракеты остается практически неизменной. Тогда на основании закона сохранения импульса $m_p v_p = m v$;

$$v_p = \frac{m v}{m_p}; \quad m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot 1 \text{ с}; \quad m = 1,35 \cdot 10^4 \text{ кг};$$

$$v_p = \frac{1,35 \cdot 10^4 \cdot 2,55 \cdot 10^3}{2,9 \cdot 10^6} \approx 11,4 \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}.$$

Отсюда КПД ракеты за 1 с после начала работы двигателей первой ступени равен:

$$\eta_1 = \frac{A_1}{Q_1} = \frac{m_k v_p^2}{q m};$$

$$\eta_1 = \frac{4 \cdot 10^4 \cdot (11,4)^2}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^7 \cdot 1,35 \cdot 10^4} \approx 1,5 \cdot 10^{-5}; \quad \eta_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ \%}.$$

По окончании работы двигателей всех ступеней КПД ракеты оказывается равным:

$$\eta_2 = \frac{A_2}{Q_2} = \frac{\frac{m_k v_k^2}{2}}{q m_r};$$

$$\eta_2 = \frac{4 \cdot 10^4 \cdot (11,2 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^7 \cdot 2,5 \cdot 10^6} = 7,8 \cdot 10^{-2}; \quad \eta_2 \approx 8 \%$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 31. Какой высоты должен быть водопад, для того чтобы вода при ударе превращалась в пар (температура воды 0°C). Сопротивлением воздуха пренебречь и считать, что вся кинетическая энергия падающей воды расходуется на ее нагревание.

Задача 32. Удельные теплоемкости при постоянном объеме водорода, гелия, азота, аргона и углекислого газа приведены во второй строке таблицы на стр. 54. Вычислите удельные теплоемкости этих газов при постоянном давлении.

Задача 33. Из решения задачи 26 следует, что вся энергия, передаваемая воздуху в квартире, оказывается переданной в действительности воздуху за пределами квартиры, следовательно, отопительные системы во всех городах и деревнях затрачивают энергию лишь на обогревание атмосферы Земли, не увеличивая запаса энергии в воздухе квартир. Для чего же работают отопительные системы?

Задача 34. Аэростат, заполненный гелием, при температуре 22°C имел объем 1000 м^3 . Насколько увеличилась его подъемная сила на той же высоте при повышении температуры гелия на 5°C ? Плотность воздуха $1,29 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Задача 35. В паровом котле находится вода при 100°C . Какую работу совершит поршень в цилиндре, соединенном с паровым котлом, если воде в котле передается 10^3 Дж ? Потерями энергии на трение пренебречь.

Задача 36. Изменится ли существенно вывод, полученный при решении задачи 28, если учесть, что организм человека способен к терморегуляции? Охлаждение организма достигается с помощью системы потоотделения. Кожа человека испаряет за сутки примерно 1 кг воды.

Задача 37. Жидкостный реактивный двигатель РД-119 «Космос» имеет силу тяги $1,08 \cdot 10^5 \text{ Н}$, скорость истечения продуктов сгорания $3,45 \cdot 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Определите мощность двигателя.

§ 32. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

ЗАДАНИЕ 1. НАБЛЮДЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИЙ С ПОМОЩЬЮ СПИНТАРИСКОПА

Оборудование: школьный спинтарископ.

Содержание и метод выполнения задания

Одним из самых простых способов регистрации отдельных атомов является сцинтилляционный способ. Сцинтилляцией называется световая вспышка, возникающая в некоторых кристаллах при попадании в них быстро движущихся атомов или других частиц.

На рисунке 55 представлена схема устройства спинтарископа — прибора, предназначенного для наблюдения свечения экрана,

вызываемого отдельными α -частицами. На острие иглы 3 помещают источник α -частиц. Таким источником служит очень небольшое количество радиоактивного элемента плутония или радия. Иглу с радиоактивным препаратом помещают внутрь трубки 2 и укрепляют над экраном 4, покрытым сернистым цинком. На другой конец трубки навинчивают лупу 1.

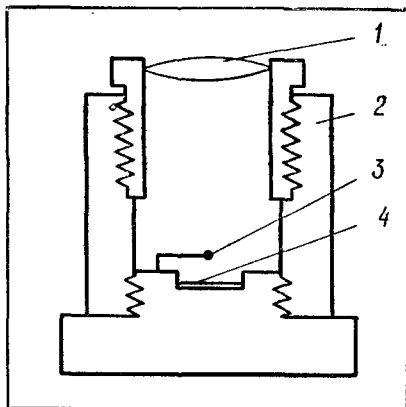


Рис. 55. Устройство спинтарископа

Человеческий глаз обладает очень большой чувствительностью к свету. Особенно замечательно свойство глаза приспосабливаться к различным интенсивностям света, в том числе и к очень слабым. После пребывания в темноте в течение 10—15 мин человек способен увидеть вспышку света, вызываемую отдельной α -частицей, т. е. обнаружить явление столкновения атома гелия с экраном.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомьтесь с устройством спинтарископа.
2. После 10—15-минутной выдержки в затемненном помещении пронаблюдайте сцинтилляции, вызываемые α -частицами.

ЗАДАНИЕ 2. ИЗМЕРЕНИЕ ВАКУУМА, СОЗДАВАЕМОГО НАСОСОМ

Измерьте давление воздуха в полном стеклянном шаре после откачивания из него воздуха с помощью насоса.

Оборудование: насос вакуумный ручной или вакуумный насос Комовского, шар полый стеклянный для взвешивания воздуха, сосуд с водой, цилиндр измерительный, зажим.

Указания. Ручной вакуумный насос двойного действия может служить для разрежения и нагнетания воздуха. Основными его деталями являются стальной цилиндр 1, поршень 3 из двух кожаных манжет, привернутых гайкой к штоку 2 с ручкой, и два клапана 4 из тонких резиновых трубок с прорезями (рис. 56).

Если в результате перемещения поршня давление воздуха в насосе становится меньше давления воздуха в сосуде, с которым соединен впускной клапан 4, то воздух из сосуда входит в насос через отверстие в резиновой трубке клапана до выравнивания давлений. При перемещении поршня в обратном направлении давление воздуха в насосе повышается, резиновая трубка впускного клапана

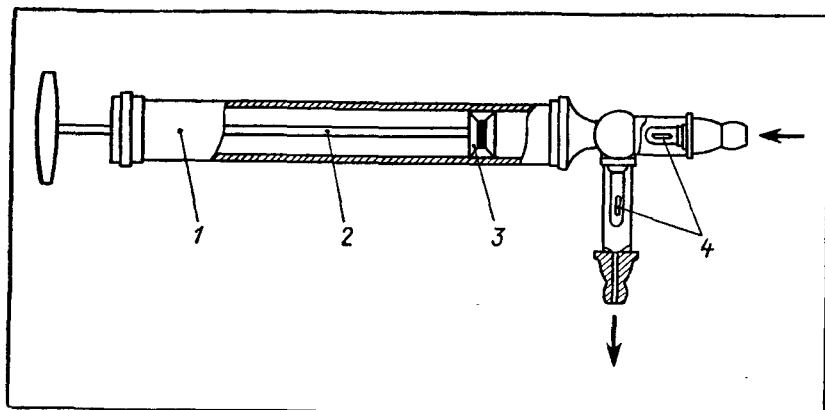


Рис. 56. Ручной вакуумный насос двойного действия

сжимается и поступление воздуха в сосуд через впускной клапан прекращается. Если при дальнейшем перемещении поршня давление воздуха в насосе превысит атмосферное давление, откроется аналогично устроенный выпускной клапан 4 и воздух выйдет через него в атмосферу.

Соединив с помощью резинового шланга ручной насос с полым стеклянным шаром, откачайте из него воздух. Перекрыв зажимом резиновый шланг, отсоедините насос.

Давление p_1 воздуха, оставшегося в шаре после откачивания и занимающего весь объем шара V_1 , можно определить, если

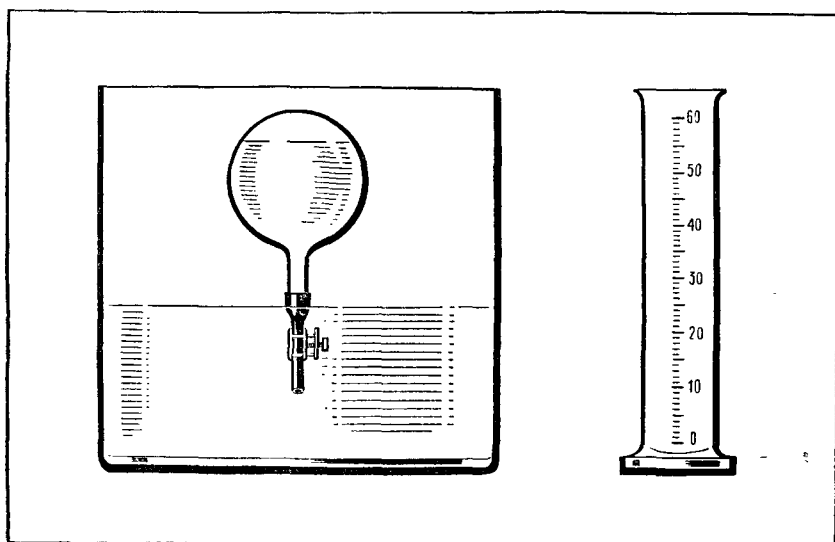


Рис. 57. Заполнение шара водой

осуществить его изотермическое сжатие до атмосферного давления p_2 . Так как

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E},$$

при постоянных значениях N и \bar{E} (т. е. при постоянной температуре T) выполняется соотношение:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\frac{2}{3} \frac{N}{V_1} \bar{E}}{\frac{2}{3} \frac{N}{V_2} \bar{E}} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Измерив объем V_1 , занимаемый разреженным воздухом в шаре, и объем V_2 , занимаемый им при атмосферном давлении p_2 , можно определить давление p_1 разреженного воздуха в шаре:

$$p_1 = p_2 \frac{V_2}{V_1}.$$

Атмосферное давление p_2 определяется с помощью барометра, объем разреженного воздуха в шаре V_1 равен объему шара, а объем V_2 той же массы воздуха при атмосферном давлении можно найти следующим образом. Опустив шланг в сосуд с водой, откройте зажим. Так как давление воздуха в шаре ниже атмосферного, вода будет засасываться в шар до тех пор, пока давление воздуха в нем не станет равным атмосферному (рис. 57). Объем воздуха V_2 при атмосферном давлении можно найти как разность между объемом шара V_1 и объемом V_3 вошедшей в шар воды:

$$V_2 = V_1 - V_3.$$

Для определения объема воды V_3 ее следует вылить из шара в измерительный цилиндр.

Указание по технике безопасности: при откачивании воздуха шар должен находиться в защитном чехле.

ЗАДАНИЕ 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Используя предложенное оборудование, соберите установку по рисунку 58. Предложите метод определения атмосферного давления при помощи этой установки. Произведите необходимые измерения и определите атмосферное давление.

Оборудование: стеклянная трубка с пробкой, резиновый шланг, линейки, штативы, вода.

Указание. Для определения атмосферного давления можно осуществить изотермический процесс расширения определенной массы воздуха, заключенного в стеклянную трубку между поверхностью воды и резиновой пробкой.

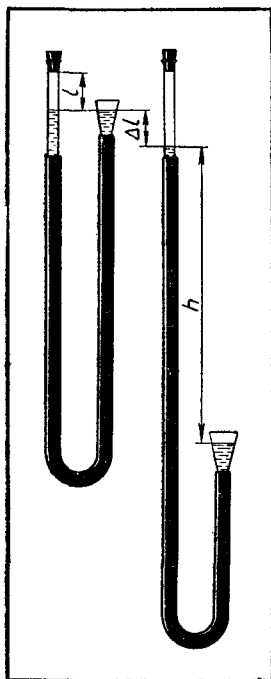


Рис. 58. Установка для определения атмосферного давления воздуха

Атмосферное давление p можно определить, если в опыте будут измерены начальный объем воздуха V , изменения его давления Δp и объема ΔV .

Возможный вариант выполнения задания

Установив перемещением воронки с водой уровень воды в стеклянной трубке на расстоянии 10—15 см от ее верхнего конца, закроем пробкой отверстие в трубке. Воздух, заключенный в трубке, находится при атмосферном давлении p и занимает объем V .

При опускании воронки на 1—1,5 м от первоначального положения давление воздуха в трубке уменьшается на величину $\Delta p = \rho gh$, где h — разность уровней воды в трубке и воронке, ρ — плотность воды, g — ускорение свободного падения. Воздух, находящийся под пробкой, при понижении давления расширяется и занимает новый объем $V + \Delta V$.

Уравнение изотермы, составленной для двух состояний воздуха в трубке, позволяет определить атмосферное давление p :

$$pV = (p - \Delta p)(V + \Delta V),$$

$$p = \frac{\Delta p(V + \Delta V)}{\Delta V}.$$

Так как $\Delta p = \rho gh$, $V = Sl$ и $\Delta V = S\Delta l$, где S — площадь поперечного сечения стеклянной трубки, l — первоначальная длина столба воздуха, Δl — изменение длины столба воздуха, то

$$p = \frac{\rho gh(l + \Delta l)}{\Delta l}.$$

Следовательно, для определения атмосферного давления необходимо измерить первоначальную длину столба воздуха в трубке при одинаковой высоте уровня воды в трубке и воронке, длину $l + \Delta l$ столба воздуха в трубке после опускания воронки и разность h высот уровней воды в трубке и воронке во втором опыте.

Определив давление атмосферного воздуха по результатам выполненных измерений, сравните полученное значение с показаниями барометра.

Контрольные вопросы

1. Исследуйте возможности повышения точности определения атмосферного давления данным методом.
2. Как устроены ртутный барометр и барометр-анероид?

ЗАДАНИЕ 4. НАБЛЮДЕНИЕ СЛЕДОВ α -ЧАСТИЦ В КАМЕРЕ ВИЛЬСОНА

Оборудование: камера для наблюдения следов α -частиц лабораторная, пробирка со смесью ацетона (25%), этилового спирта (60%) и воды (15%), пипетка.

Содержание и метод выполнения задания

Образование капель жидкости в пересыщенном паре становится возможным при наличии так называемых центров конденсации. Центрами конденсации могут служить небольшие твердые частицы пыли, а также положительные и отрицательные ионы. Способность ионов служить центрами конденсации пересыщенного пара используется в камере Вильсона — приборе для регистрации быстрых заряженных частиц.

Школьная лабораторная камера Вильсона устроена следующим образом. На пластмассовое кольцо с двух сторон наклеены две прозрачные пластины из органического стекла (рис. 59). В кольцо вмонтирован штуцер, который через резиновый шланг соединен с резиновой грушей. В пластмассовое кольцо вмонтирован также металлический стержень, располагающийся по радиусу кольца. На конец этого стержня, находящийся в центре рабочего объема камеры, нанесен тонкий слой радиоактивного вещества, испускающего α -частицы.

α -Частицы, испускаемые радиоактивным веществом, представляют собой атомы гелия, лишенные электронной оболочки, т. е. являются двухзарядными положительными ионами. Вылетая из радиоактивного препарата со скоростью, близкой к скорости света, α -частица сбивает электрон с оболочки практически каждого встретившегося на ее пути атома, в результате чего вдоль траектории движения α -частицы в газе образуется плотная колонка положительных и отрицательных ионов.

Если во время движения α -частицы в камере имеется пересыщенный пар, на ионах происходит конденсация ка-

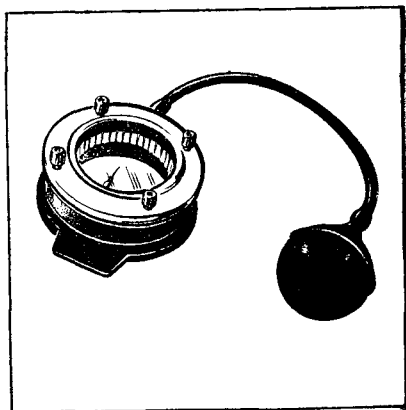


Рис. 59. Камера Вильсона

пель жидкости и вдоль траектории движения частицы образуется полоска тумана — т р е к.

Для выполнения опытов камера предварительно с помощью резиновой груши наполняется насыщенными парами ацетона, спирта и воды. Переход паров в состояние пересыщения происходит в результате их охлаждения при быстром расширении.

Порядок выполнения задания

1. Откройте пробирку со смесью ацетона, этилового спирта и воды. Вставив в пробирку наконечник резиновой груши из комплекта лабораторной камеры Вильсона, произведите несколько сжатий и расширений, для того чтобы груша заполнилась насыщенными парами смеси.

2. Соедините резиновую грушу гибким шлангом с камерой Вильсона и произведите несколько легких сжатий и расширений груши для заполнения рабочего объема камеры насыщенными парами смеси.

3. Поместите камеру Вильсона на темную подставку. Если освещенность на месте проведения опыта мала, включите настольную лампу и осветите ею камеру сверху.

4. Для очищения рабочего объема камеры от ионов, возникших ранее, нужно наэлектризовать верхнюю плексигласовую крышку, натирая ее куском шерстяной ткани.

5. Для наблюдения следов α -частиц медленно сожмите грушу, а затем быстро отпустите ее. Если степень сжатия окажется удачной, на ионах, возникших вдоль траекторий движения α -частиц, произойдет конденсация пересыщенного пара, капельки тумана образуют трек — видимый след движения α -частицы.

Если треки частиц в первом опыте не обнаружатся, повторяйте операции сжатия и разрежения несколько раз, изменяя степень сжатия.

Скорость расширения газа в камере, также оказывающую влияние на успешность результатов, можно регулировать, изменяя величину отверстия, через которое выходит воздух из камеры, с помощью регулировочного винта зажима на резиновом шланге.

ЗАДАНИЕ 5. ИЗУЧЕНИЕ КОЛЛЕКЦИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ

Оборудование: лупа, коллекция минералов и горных пород, набор «Шкала твердости», коллекция «Металлы и сплавы».

Содержание и метод выполнения задания

Почти все твердые тела состоят из кристаллов, однако обнаружить их кристаллическое строение путем внешнего осмотра удается далеко не всегда. Характерный признак кристалла — наличие плоских граней. Большинство природных и искусственно изготовлен-

ных твердых тел имеет поликристаллическое строение. При рассмотрении невооруженным глазом заметить их кристаллическое строение трудно. Но если образец со свежей поверхностью излома и крупнозернистой структурой рассмотреть через лупу, то можно сделать вывод о его кристаллическом строении по характерному для кристаллов признаку — наличию плоских поверхностей у кристаллических зерен. На свежих изломах грани отдельных кристаллов обнажены особенно хорошо. Поворачивая образец, можно наблюдать поблескивание таких граней.

Порядок выполнения задания

1. Ознакомьтесь с различными видами кристаллов, рассмотрите кристаллы кварца, известкового шпата, каменной соли, сильвина, карналлита, гипса, апатита, полевого шпата, топаза, плавикового шпата. Выпишите химические формулы каждого из этих минералов.

2. Зарисуйте кристаллы кварца, исландского шпата, сильвина, гипса.

3. Используя лупу, осмотрите образцы магнезита, железного шпата, корунда, агата, кремния, яшмы, чугуна, железа, алюминия, меди, баббита. Выпишите химическую формулу каждого из образцов. Образцы, у которых вам удалось обнаружить кристаллическую структуру, запишите в одну колонку, образцы, у которых кристаллическую структуру вам обнаружить не удалось, — в другую.

4. С помощью лупы рассмотрите структуру образцов горных пород: гранита, песчаника, известняка, мрамора.

ЗАДАНИЕ 6. НАБЛЮДЕНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА КРИСТАЛЛОВ

Оборудование: микроскоп, предметное стекло, стеклянная палочка, насыщенные растворы хлористого аммония, щавелево-кислого аммония, поваренной соли, гидрохинона.

Содержание и метод выполнения задания

Раствором называется однородная смесь, в которой молекулы одного вещества равномерно распределены между молекулами другого. Взаимное растворение двух веществ имеет некоторые пределы, которые зависят от природы растворителя, растворяемого вещества и температуры.

Цель настоящей работы — наблюдение процесса роста кристаллов различных веществ в пересыщенном водном растворе. Для этого небольшое количество насыщенного раствора помещается на предметное стекло под объектив микроскопа. Испарение воды делает раствор пересыщенным, и в нем начинается кристаллизация. Процесс кристаллизации удобно наблюдать в микроскоп с 80-кратным увеличением, используя объектив с восьмикратным и окуляр с десятикратным увеличением.

Порядок выполнения работы

1. Поместите на столик микроскопа предметное стекло, отрегулируйте освещение и вращением микрометрического винта добейтесь получения четкого изображения поверхности предметного стекла. Наводку на резкость можно облегчить нанесением на поверхность стекла метки карандашом.

Внимание!

При наводке на резкость вращение винта следует производить с осторожностью, чтобы не допустить повреждения объектива при соприкосновении с предметным стеклом.

2. Выньте предметное стекло из зажимов и поместите на него с помощью стеклянной палочки каплю насыщенного раствора хлористого аммония.

3. Поместите стекло с каплей под объектив микроскопа так, чтобы в поле зрения был виден край капли, так как первые кристаллы образуются обычно на краю капли.

4. Пронаблюдайте процесс зарождения и роста кристаллов. Результаты наблюдений занесите в отчет, который должен содержать описание процесса роста кристаллов и зарисовку картины, видимой в микроскоп.

5. Аналогичные наблюдения и зарисовки выполните с использованием раствора поваренной соли, щавелево-кислого аммония, гидрoхинона.

ЗАДАНИЕ 7. ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Оборудование: порошок алюмокалиевых квасцов, **термометр**, дистиллированная вода, химические стаканы, электрическая плитка, **воронка**, стеклянная палочка, вата.

Содержание и метод выполнения задания

Существуют два простых способа выращивания кристаллов из пересыщенного раствора: путем охлаждения насыщенного раствора или путем его выпаривания. Первым этапом при любом из двух способов является приготовление насыщенного раствора.

Растворимость любых веществ зависит от температуры. Обычно с повышением температуры растворимость увеличивается, а с понижением температуры — уменьшается. На рисунке 60 показана зависимость растворимости алюмокалиевых квасцов от температуры.

График позволяет увидеть, что при охлаждении насыщенного при 40 °С раствора до 20 °С в нем будет находиться около 15 г избыточного количества квасцов на 100 г воды. При отсутствии центров кристаллизации это вещество может оставаться в растворе, т. е. раствор будет пересыщенным.

С появлением центров кристаллизации избыток вещества выде-

ляется из раствора, и при каждой данной температуре в растворе остается то количество вещества, которое соответствует коэффициенту растворимости при этой температуре. Избыток вещества из раствора выпадает в виде кристаллов, число которых тем больше, чем большее число центров кристаллизации содержится в растворе. Центрами кристаллизации могут служить загрязнения на стенках посуды с раствором, пылинки, мелкие кристаллики квасцов. Если дать выпавшим кристалликам подрасти в течение суток, то среди них найдутся чистые и совершенные по форме экземпляры, они могут служить затравками для выращивания крупных кристаллов.

Для выращивания крупного кристалла в тщательно отфильтрованный насыщенный раствор вносят кристаллик-затравку, заранее прикрепленный на волосе или тонкой леске, предварительно обработанной спиртом (рис. 61).

Можно вырастить кристалл и без затравки. Для этого волос или леску обрабатывают спиртом и опускают в раствор так, чтобы конец висел свободно. На конце волоса или лески может начаться рост кристалла. Во время роста кристалла стакан с раствором лучше всего держать в теплом сухом месте, где температура в течение суток остается постоянной. На выращивание крупного кристалла в зависимости от условий эксперимента может потребоваться от нескольких дней до нескольких недель.

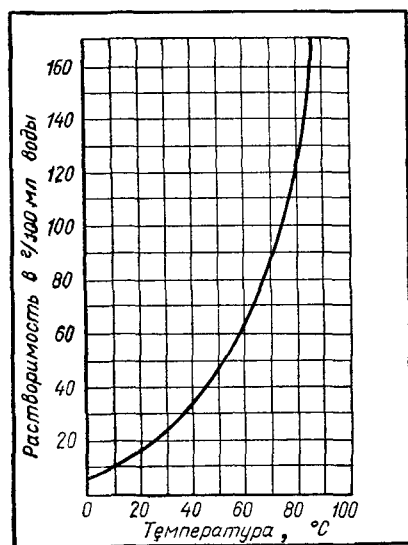


Рис. 60. Зависимость растворимости алюмокалиевых квасцов от температуры

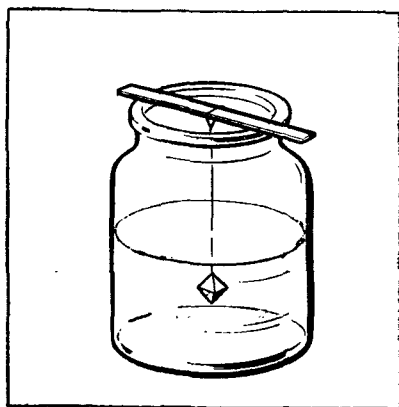


Рис. 61. Для выращивания крупного кристалла в насыщенный раствор вносится затравка

Порядок выполнения задания

1. Тщательно вымойте два стакана и воронку, подержите их над паром.

2. Налейте 100 г дистиллированной (или дважды прокипяченной) воды в стакан и нагрейте ее до 30 °С. Используя кривую растворимости, приведенную на рисунке 60, определите массу квасцов, необходимую для приготовления насыщенного раствора при 30 °С. Приготовьте насыщенный раствор и слейте его через ватный фильтр в чистый стакан.

3. Через сутки слейте раствор через ватный фильтр в чистый, заново вымытый пропаренный стакан. Среди множества кристаллов, оставшихся на дне первого стакана, выберите самый чистый кристалл правильной формы. Прикрепите кристалл-затравку к волосу или леске и подвесьте его в раствор. Волос или леску предварительно протрите ватой, смоченной спиртом. Можно также положить кристалл-затравку на дно стакана перед заливкой в него раствора. Поставьте стакан в теплое чистое место. В течение нескольких суток или недель не трогайте кристалл и не переставляйте стакан. В конце срока выращивания выньте кристалл из раствора, тщательно осушите бумажной салфеткой и уложите в специальную коробку. Руками кристалл не трогайте, иначе он потеряет прозрачность.

Домашнее лабораторное задание

Таким же способом, какой предложен в описании задания 7, приготовьте дома насыщенный раствор поваренной соли или сахара и попробуйте вырастить в нем крупные кристаллы.

ЗАДАНИЕ 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМОСТИ СВИНЦА

Оборудование: свинец (дробь) 0,15—0,2 кг, картонная трубка термометр, воронка, линейка.

Содержание и метод выполнения задания

Для определения удельной теплоемкости свинца можно использовать явление нагревания твердых тел при пластической деформации. В картонный цилиндр насыпают дробь, начальная температура которой T_1 предварительно измерена. Затем вертикально расположенный картонный цилиндр резко поворачивают вокруг горизонтальной оси на 180°. Поднятая на высоту h (рис. 62) дробь падает, и ее потенциальная энергия превращается в кинетическую. При достижении дна цилиндра кинетическая энергия дроби расходуется на пластическую деформацию, сопровождающуюся увеличением внутренней энергии свинца. Потерями тепла можно пренебречь,

так как теплопроводность картона мала, а длительность опыта невелика.

При высоте падения порядка одного метра повышение температуры дроби оказывается настолько малым, что его невозможно измерить в условиях школьного физического кабинета. Для того чтобы разность температур составляла несколько градусов и ее можно было измерить обычным термометром с ценой деления 1 К, переворот цилиндра должен быть повторен примерно 100 раз. Если цилиндр переворачивается N раз, то увеличение внутренней энергии дроби будет равно $\Delta U = Nmgh$.

Измерив температуру дроби в начале опыта и по его окончании, можно выразить изменение внутренней энергии дроби через количество теплоты Q , которое потребовалось бы для такого же изменения внутренней энергии дроби путем теплопередачи

$$\Delta U = Q = cm\Delta T.$$

Таким образом, удельная теплоемкость свинца c может быть определена через работу A , совершаемую при пластической деформации дроби, массу m свинца и изменение его температуры ΔT :

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \cdot \Delta T} = \frac{A}{m \cdot \Delta T} = \frac{Nmgh}{m \cdot \Delta T} = \frac{Ngh}{\Delta T}.$$

Порядок выполнения задания

1. Открыв картонный цилиндр, измерьте расстояние h от дроби до противоположной крышки цилиндра.

2. Измерьте температуру дроби T_1 , погрузив в нее термометр на время, достаточное для наступления теплового равновесия. Измерение температуры нужно проводить вдали от нагревательных приборов, предохранять дробь от попадания прямых солнечных лучей и не прикасаться к ней руками.

3. Закройте цилиндр и 100 раз переверните его на 180° вокруг горизонтальной оси.

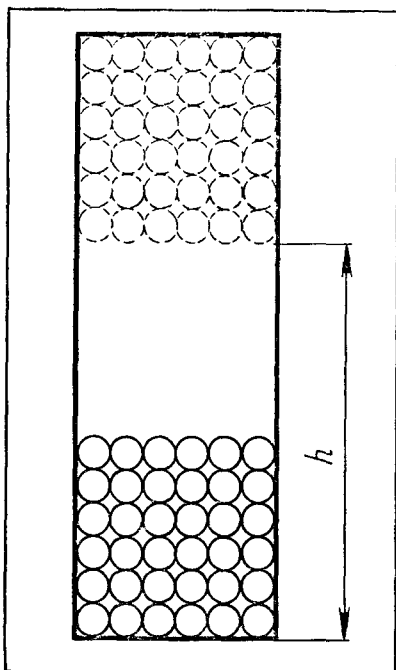


Рис. 62. Прибор для определения удельной теплоемкости свинца

4. Измерьте температуру дробы, учитывая указания, содержащиеся в пункте 2. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу и вычислите удельную теплоемкость свинца.

5. Через 15—20 мин повторите опыт.

Отчетная таблица

№ п/п	h , м	T_1 , К	N	T_2 , К	$\Delta T = T_2 - T_1$, К	$c = N \frac{gh}{\Delta T}$, Дж·кг ⁻¹ ·К ⁻¹
1						
2						

ЗАДАНИЕ 9. СРАВНЕНИЕ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ МЕТАЛЛОВ

Оборудование: алюминиевое, медное и железное тела массой 50—100 г, калориметр, мензурка, термометр, сосуд с водой, электроплитка, весы с разновесом.

Содержание и метод выполнения задания

Из классической теории теплоемкости следует, что теплоемкость одного моля одинакова для всех веществ в твердом состоянии и равна:

$$C = 3R \approx 25 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Это предсказание теории легко проверить. Для этого достаточно определить количество тепла Q , отдаваемого твердым телом известной массы m при охлаждении в известном интервале температур ΔT .

Порядок выполнения задания

1. Определите с помощью весов массу калориметра m_k и массы медного, железного и алюминиевого тел. Результаты измерений занесите в отчетную таблицу.

2. Опустите тела в сосуд с кипящей водой.

3. Налейте в калориметр 100 см³ воды при комнатной температуре. Измерьте начальную температуру воды и калориметра T_1 .

4. Опустите в калориметр медное тело, нагретое до температуры 100 °С, и определите температуру Θ в калориметре после установления теплового равновесия.

5. Используя уравнение теплового баланса, вычислите количество теплоты Q , переданное медным телом калориметру и воде:

$$Q = (c_k m_k + c_v m_v) (\Theta - T_1),$$

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 33. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Основные законы взаимодействия электрических зарядов. Все известные закономерности взаимодействия неподвижных электрических зарядов можно получить как следствия из трех основных законов, установленных экспериментально: закона сохранения электрического заряда, закона Кулона и принципа суперпозиции.

Закон сохранения электрического заряда утверждает, что электрический заряд изолированной системы остается постоянным при любых физических процессах, происходящих в системе. Так как электрические заряды бывают двух знаков, положительные и отрицательные, закон сохранения электрического заряда не утверждает, что невозможно возникновение или исчезновение электрических зарядов в замкнутой системе. Положительные и отрицательные заряды в замкнутой системе могут возникать или исчезать, но всегда так, чтобы их алгебраическая сумма оставалась постоянной.

Закон Кулона записывается в форме

$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2}$$

и означает, что между двумя точечными электрическими зарядами q_1 и q_2 действует сила F_3 , прямо пропорциональная произведению зарядов и обратно пропорциональная квадрату расстояния R между ними. Сила F_3 направлена вдоль прямой, соединяющей заряды.

Закон Кулона определяет силы взаимодействия двух точечных электрических зарядов. А по каким законам происходит взаимодействие трех, четырех и т. д. зарядов? Опыт показывает, что сила взаимодействия двух электрических зарядов совершенно не изменяется при появлении вблизи них третьего, четвертого и т. д. электрических зарядов. Вместе с тем взаимодействие каждого из этих двух зарядов с третьим, четвертым и т. д. зарядами определяется в свою очередь законом Кулона. Результирующая сила дейст-

вия нескольких зарядов на один заряд является геометрической суммой сил, определяемых по закону Кулона для попарного взаимодействия с каждым из них (рис. 63).

Эта закономерность взаимодействия электрических зарядов называется принципом суперпозиции.

Электрическое поле. Итак, экспериментально установлено, что на расстоянии R от одного электрического заряда в пространстве, которое кажется нам совершенно пустым, на другой электрический заряд действует сила F_9 . Этот факт позволяет высказать предположение, что вокруг каждого электрического заряда существует нечто материальное, неразрывно связанное с этим зарядом. Это «нечто» назовем электрическим полем.

Если существует электрическое поле, то взаимодействие точечных электрических зарядов q_1 и q_2 есть результат действия поля заряда q_1 на заряд q_2 и поля заряда q_2 на заряд q_1 .

Напряженность электрического поля. Для количественного описания действия электрического поля на заряд, помещенный в данную точку поля, введем силовую характеристику электрического поля — напряженность \vec{E} .

Напряженность электрического поля \vec{E} определяется как отношение силы \vec{F}_9 , действующей на электрический заряд q_1 , помещенный в данную точку поля, к заряду q_1 :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_9}{q_1}.$$

Определим напряженность электрического поля на расстоянии R от точечного заряда q .

На расстоянии R от электрического заряда q на заряд q_1 по закону Кулона действует сила

$$F_9 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2}.$$

С другой стороны, используя понятие напряженности E электрического поля заряда q для той же силы F_9 , можно записать выражение:

$$F_9 = q_1 E.$$

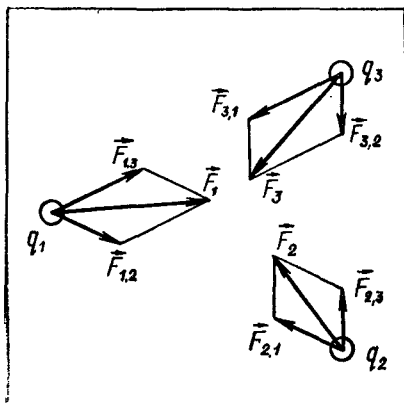


Рис. 63. Взаимодействие электрических зарядов

Из этих двух выражений для одной и той же силы F_3 , следует:

$$q_1 E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2}, \text{ откуда } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2}.$$

Мы получили, что напряженность электрического поля точечного электрического заряда прямо пропорциональна заряду q и обратно пропорциональна квадрату расстояния R от него до данной точки поля.

Направление вектора напряженности \vec{E} электрического поля совпадает с направлением вектора силы \vec{F}_3 , действующей со стороны поля на положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Экспериментально установленный факт независимости сил взаимодействия двух зарядов от наличия других зарядов является доказательством того, что электрические поля не взаимодействуют между собой. В одной и той же точке пространства одновременно существуют электрические поля сколько угодно большого числа различных электрических зарядов и не оказывают друг на друга никакого влияния, т. е. электрические поля подчиняются принципу суперпозиции. При одновременном действии на электрический заряд двух электрических полей с напряженностями \vec{E}_1 и \vec{E}_2 равнодействующая сила является геометрической суммой сил \vec{F}_1 и \vec{F}_2 :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = q\vec{E}_1 + q\vec{E}_2.$$

Производя опыты по обнаружению электрического поля в данной точке пространства, мы всегда можем измерить лишь равнодействующую силу \vec{F} , но не можем узнать, является ли эта сила следствием существования одного электрического поля с напряженностью \vec{E} или в данной точке пространства происходит наложение нескольких электрических полей и геометрическая сумма их векторов напряженности равна \vec{E} :

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Линии напряженности электрического поля и поток вектора напряженности. Наглядную картину для описания электрического поля можно получить, введя понятие *линии напряженности электрического поля* — линии, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором напряженности электрического поля в точке касания.

Направление линии напряженности принимается совпадающим с направлением вектора силы, действующей в данной точке поля на точечный положительный электрический заряд. В соответствии с этим *линии напряженности считаются выходящими из положительных зарядов и входящими в отрицательные заряды* (рис. 64).

Условимся проводить в пространстве вокруг электрического заряда столько линий напряженности электрического поля, чтобы

через единицу поверхности, к которой они в каждой точке перпендикулярны, проходило число линий, равное напряженности E . Тогда отношение алгебраической суммы числа силовых линий Φ , пронизывающих такую поверхность, к площади поверхности S равно напряженности E электрического поля у данной поверхности. При счете число силовых линий, выходящих из поверхности, принимается положительным, а входящих — отрицательным. Алгебраическая сумма Φ числа входящих и выходящих силовых линий называется потоком вектора напряженности электрического поля.

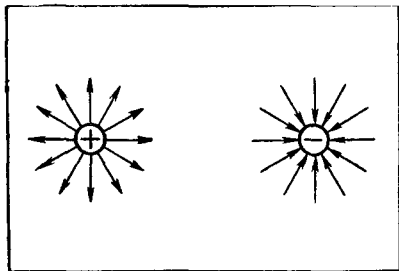


Рис. 64. Линии напряженности электрического поля

Теорема Гаусса. Определим полный поток вектора напряженности электрического поля точечного электрического заряда q . Для этого представим себе, что заряд окружен сферической поверхностью радиусом R , центр которой совпадает с зарядом q . Так как на расстоянии R от точечного заряда напряженность электрического поля равна:

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

и силовые линии в любой точке перпендикулярны поверхности шара, то полное число силовых линий Φ , пронизывающих поверхность шара, равно:

$$\Phi = SE = \frac{4\pi R^2 q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{q}{\epsilon_0},$$

т. е. из положительного заряда q выходит $\frac{q}{\epsilon_0}$ силовых линий.

Так как электрические поля не влияют друг на друга, поток Φ вектора напряженности электрического поля любой системы электрических зарядов через любую замкнутую поверхность, окружающую эти заряды, равен алгебраической сумме электрических зарядов, деленной на электрическую постоянную вакуума ϵ_0 :

$$\Phi = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}.$$

Это утверждение называется теоремой Гаусса.

Используя теорему Гаусса, можно вычислять напряженность электрического поля вокруг заряженных тел различной формы.

Напряженность поля заряженной плоскости. Применим теорему Гаусса для определения напряженности электрического поля заряженной плоскости. Если плоскость заряжена равномерно, т. е. поверхностная плотность заряда σ одинакова в любом ее месте, то

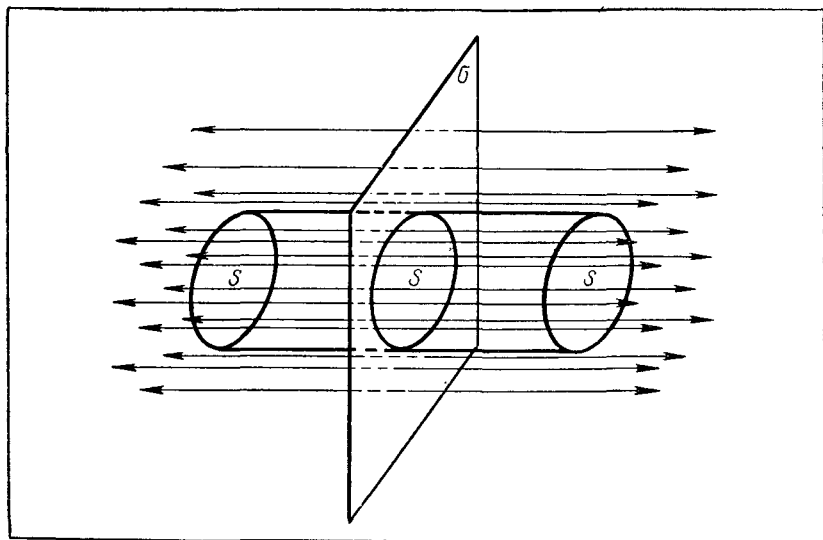


Рис. 65. Электрическое поле заряженной плоскости

линии напряженности электрического поля в любой точке перпендикулярны заряженной плоскости. Такое же направление они сохраняют и на любом расстоянии от плоскости.

Так как линии напряженности электрического поля бесконечной равномерно заряженной плоскости параллельны друг другу, поток вектора напряженности Φ электрического поля через участок поверхности площадью S , параллельной заряженной плоскости, остается одинаковым на любом расстоянии от плоскости. Следовательно, и напряженность E электрического поля $E = \frac{\Phi}{S}$ одинакова на любом расстоянии от плоскости.

Для нахождения напряженности электрического поля заряженной плоскости мысленно выделим в пространстве цилиндр, боковая поверхность которого перпендикулярна заряженной плоскости, а основания параллельны ей. Цилиндр вырезает из заряженной плоскости участок площадью S , такую же площадь имеют основания цилиндра, расположенные по разные стороны от плоскости (рис. 65).

Согласно теореме Гаусса поток Φ вектора напряженности электрического поля через поверхность цилиндра связан с электрическим зарядом внутри цилиндра выражением:

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}.$$

С другой стороны, так как линии напряженности пересекают лишь основания цилиндра, поток вектора напряженности можно выра-

зять через напряженность электрического поля у оснований цилиндра:

$$\Phi = E \cdot 2S.$$

Из двух выражений для потока вектора напряженности получим:

$$E \cdot 2S = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}, \quad E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}.$$

Отсюда можно получить приближенное выражение для нахождения напряженности электрического поля между обкладками плоского конденсатора. Если размеры пластин плоского конденсатора значительно превосходят расстояние между ними, то электрическое поле каждой из пластин внутри конденсатора можно считать близким к полю бесконечной равномерно заряженной плоскости. Так как направление силовых линий напряженности электрического поля разноименно заряженных пластин внутри конденсатора совпадает, то напряженность поля внутри плоского конденсатора равна:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}.$$

Так как $\sigma = \frac{q}{S}$, где q — заряд одной пластины конденсатора, S — ее площадь, то $E = \frac{q}{S \cdot \epsilon_0}$.

Во внешнем пространстве силовые линии напряженности электрического поля разноименно заряженных пластин имеют противоположное направление, поэтому вне конденсатора результирующее значение напряженности электрического поля практически равно нулю (рис. 66).

§ 34. ПОТЕНЦИАЛ

Работа при перемещении заряда в электрическом поле. При перемещении заряда в электрическом поле совершается работа. Выясним сначала, от чего зависит работа в поле точечного заряда. Два наиболее простых случая — это перемещение вдоль линий напряженности электрического поля и в направлении, перпендикулярном этим линиям. При перемещении заряда q в направлении действия силы \vec{F}_e вдоль линии напряженности

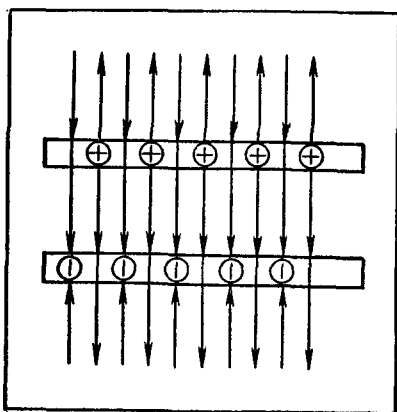


Рис. 66. Электрическое поле плоского конденсатора

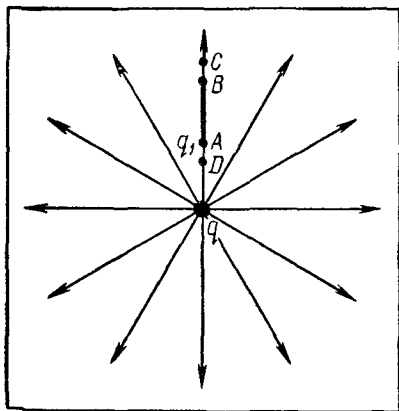


Рис. 67. Перемещение заряда вдоль линии напряженности электрического поля

работа положительна, при движении в противоположном направлении — отрицательна.

В результате перенос заряда q , например, из точки A сначала в точку C (рис. 67), а затем из точки C в точку A сопровождается совершением суммарной работы электрического поля, равной нулю, так как $\vec{AC} = -\vec{CA}$.

Поэтому перемещение заряда q_1 в электрическом поле точечного заряда q из точки A в точку B по путям AB , ACB или ADB сопровождается совершением одинаковой работы.

Сила F_3 взаимодействия заряда q_1 с электрическим полем точечного заряда изменяется по

одному и тому же закону в зависимости от расстояния до заряда q вдоль любой из линий напряженности. Поэтому работа по перемещению электрического заряда q вдоль различных линий напряженности при одинаковых расстояниях от заряда начальной и конечной точек пути оказывается одинаковой. При перемещении заряда q_1 по поверхности сферы, центр которой совпадает с зарядом q , электрическое поле заряда q не совершает работы, так как в любой точке пути направление вектора перемещения оказывается перпендикулярным направлению вектора силы \vec{F}_3 .

Рассмотрим теперь перемещение заряда q_1 из точки A в точку B при произвольном их расположении в поле точечного заряда q . Траекторию AB движения заряда можно представить состоящей из чередующихся участков пути, совпадающих с линиями напряженности, и дуг окружностей, центр которых совпадает с зарядом q (рис. 68). При перемещении заряда q_1 по дугам окружностей работа электрического поля равна нулю, при перемещении вдоль любой линии напряженности работа на одинаковом расстоянии от заряда q одинакова. Поэтому работа при любом перемещении заряда q_1 в поле точечного заряда q из точки A на расстоянии r_1 от заряда q до точки B на расстоянии r_2 от заряда q равна работе по перемещению того же заряда q_1 вдоль одной силовой линии между точками, находящимися на расстояниях r_1 и r_2 от заряда q . Следовательно, *работа электрического поля точечного заряда при перемещении любого заряда из одной точки поля в другую не зависит от формы пути. Поля, обладающие таким свойством, называются потенциальными полями.*

В любой системе электрических зарядов электрические поля отдельных точечных зарядов согласно принципу суперпозиции со-

вершено не влияют друг на друга. Работа при перемещении электрического заряда q_1 в поле каждого точечного заряда, входящего в систему, не зависит от формы пути. Следовательно, полная работа в электрическом поле любой системы неподвижных электрических зарядов не зависит от формы пути, т. е. *электрическое поле любой системы неподвижных зарядов является потенциальным полем.*

Потенциал электрического поля точечного заряда. Так как на заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила F_e , зависящая от координат, то заряд в каждой точке электрического поля обладает запасом потенциальной энергии. Потенциальная энергия тела или системы тел является относительной величиной, зависящей от условного выбора состояния, запас потенциальной энергии в котором принимается равным нулю.

При рассмотрении электрического поля точечного заряда q удобно принять, что на бесконечно большом расстоянии от него,

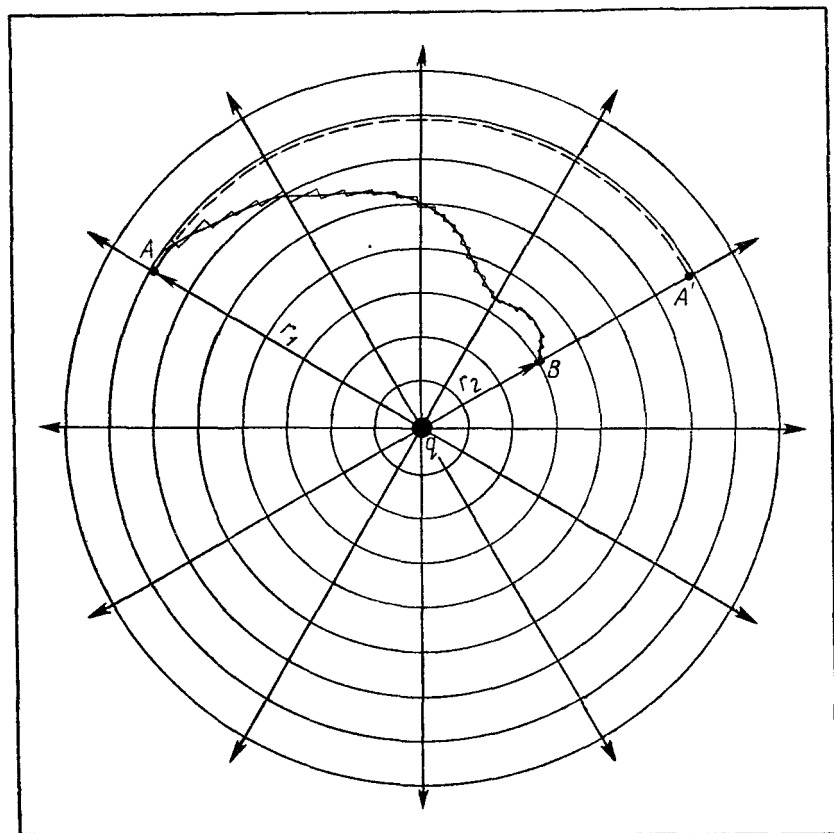


Рис. 68. Перемещение заряда в электрическом поле точечного заряда

где напряженность поля стремится к нулю, потенциальная энергия взаимодействия любого другого заряда q_1 с зарядом q равна нулю. При таком условии потенциальную энергию Π_1 заряда q_1 в точке, находящейся на расстоянии r_1 от заряда q , можно найти, вычислив работу, совершаемую полем при перемещении заряда q_1 из этой точки на бесконечно большое расстояние от заряда q .

При перемещении заряда работа электрического поля равна изменению потенциальной энергии заряда, взятому с обратным знаком:

$$A_{12} = -\Delta\Pi = -(\Pi_2 - \Pi_1).$$

Если $\Pi_2 = 0$, т. е. заряд q_1 удаляется на бесконечно большое расстояние от заряда q , то

$$A_{12} = \Pi_1,$$

т. е. потенциальная энергия заряда q_1 в электрическом поле равна работе электрического поля, совершаемой при удалении заряда q_1 на бесконечно большое расстояние от заряда q .

Работа электрического поля пропорциональна силе F_9 , действующей на заряд q_1 со стороны электрического поля:

$$A_{12} \sim F_9,$$

а сила F_9 пропорциональна перемещаемому заряду q_1 , так как в любой точке поля равна:

$$F_9 = q_1 E.$$

Следовательно, потенциальная энергия Π_1 заряда в электрическом поле пропорциональна заряду:

$$\Pi_1 = q_1 \Phi_1.$$

Величина Φ_1 , определяемая как отношение потенциальной энергии E_1 заряда в данной точке электрического поля к заряду

$$\Phi_1 = \frac{\Pi_1}{q_1},$$

является энергетической характеристикой поля в данной точке и называется потенциалом поля.

Связь между потенциалом электрического поля в данной точке и потенциальной энергией заряда позволяет выразить работу электрического поля при перемещении заряда из одной точки в другую через разность потенциалов поля в этих точках:

$$A_{12} = -(\Pi_2 - \Pi_1) = -(q_1 \Phi_2 - q_1 \Phi_1) = q_1 (\Phi_1 - \Phi_2).$$

При перемещении заряда q_1 в электрическом поле неподвижных зарядов работа равна произведению заряда q_1 на разность потенциалов начальной и конечной точек пути.

Найдем потенциал электрического поля на расстоянии r от точечного заряда q . Для этого сначала определим работу, совершаемую полем при некотором перемещении заряда q_1 вдоль линии напряженности поля заряда q .

Трудность решения этой задачи заключается в том, что в каждой новой точке пути сила F_3 , действующая на заряд q_1 со стороны электрического поля, принимает новое значение. С вычислением работы переменной силы мы встречались, например, при определении работы силы упругости. Так как сила упругости изменяется пропорционально деформации Δx , работа переменной силы оказывается равной произведению среднего арифметического значения силы упругости на перемещение.

Этот способ нахождения работы переменной силы оказывается непригодным для вычисления работы электрического поля точечного заряда, так как зависимость силы F_3 от координат нелинейная. При обратно пропорциональной зависимости силы F_3 от квадрата расстояния до заряда работа электрического поля при перемещении вдоль линии напряженности оказывается равной произведению среднего геометрического значения силы F_3 на перемещение Δr :

$$A_{12} = F_{\text{ср}} \cdot \Delta r = \sqrt{F_1 F_2} \Delta r.$$

Преобразуя это выражение, получим:

$$\begin{aligned} A_{12} &= \sqrt{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q}{r_1^2} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q}{r_2^2}} (r_2 - r_1) = \\ &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q}{r_1 r_2} (r_2 - r_1) = q_1 \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_2} \right). \end{aligned}$$

При удалении заряда q_1 на бесконечно далекое расстояние от заряда q ($r_2 \rightarrow \infty$, $\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_2} = 0$) работа электрического поля по определению равна потенциальной энергии заряда в данной точке поля:

$$A_{12} = q_1 \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} = \Pi_1.$$

С другой стороны, по определению потенциала φ электрического поля

$$\Pi_1 = q_1 \varphi_1, \text{ откуда } \varphi_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_1}.$$

Следовательно, потенциал φ электрического поля на расстоянии r от точечного заряда q определяется выражением:

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

§ 35. ДИЭЛЕКТРИКИ И ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Так как в проводнике число свободных электронов примерно равно числу атомов, то в 1 см^3 проводника их количество измеряется числами порядка 10^{23} — 10^{23} . Ничтожной доли этого количества электронов достаточно для того, чтобы при перемещении к одной из поверхностей создать внутри проводника электрическое

поле, напряженность которого равна напряженности внешнего поля по модулю и противоположна по направлению. Перемещение свободных зарядов в проводнике, помещенном в электрическом поле, прекращается тогда, когда в любой точке внутри проводника напряженность суммарного электрического поля становится равной нулю.

При внешнем сходстве электризация проводников и диэлектриков имеет существенные различия. Индуцированные заряды на поверхности проводников возникают в результате перемещения свободных зарядов внешним полем. После разделения находящегося в электрическом поле проводника на две части и удаления обеих частей из поля они оказываются разноименно заряженными.

Аналогичный опыт с диэлектриком дает совсем другой результат: части разделенного в электрическом поле диэлектрика оказываются электрически нейтральными, т. е. индуцированные заряды в диэлектриках разделить невозможно. В диэлектриках практически нет свободных зарядов, способных перемещаться под действием поля. Механизм электризации диэлектриков называется поляризацией и заключается в перераспределении под действием поля зарядов внутри нейтральных атомов и молекул либо в поворотах диполей в полярных диэлектриках.

Заряды на поверхности наэлектризованного полем тела уменьшают напряженность внешнего поля E_0 в пространстве, занимаемом образцом.

Величина, показывающая, во сколько раз напряженность поля E в веществе меньше, чем напряженность поля E_0 в вакууме, называется относительной диэлектрической проницаемостью данного вещества:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Электреты. В некоторых диэлектриках поляризация не исчезает сразу после устранения внешнего электрического поля. *Диэлектрики, длительно сохраняющие поляризацию после устранения внешнего электрического поля и создающие в окружающем пространстве собственное электрическое поле, называются электретами.*

Время сохранения поляризации без заметного ее уменьшения в различных электретах различно. Во многих случаях оно исчисляется десятилетиями. К электретам относятся многие известные диэлектрики: стекло, плексиглас, эбонит, канифоль, сера, парафин, нейлон. Но качество этих электретов невысокое. Если расплавить смесь воска и смолы и медленно охладить ее до комнатной температуры в электрическом поле с напряженностью порядка 10^6 В/м, ориентация молекулярных диполей, полученная в жидком состоянии, сохраняется и в затвердевшей смеси. Диполи как бы «замораживаются». В результате получается образец, создающий в окружающем пространстве электрическое поле, которое существует практически неограниченно долго.

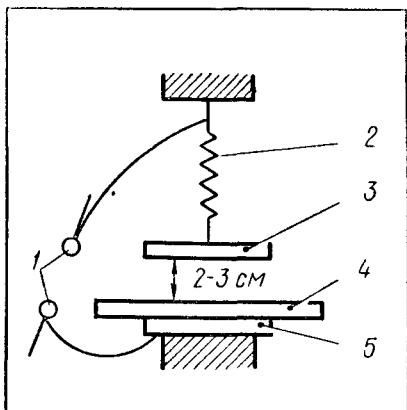


Рис. 69. Схема опыта по наблюдению электретных свойств оргстекла

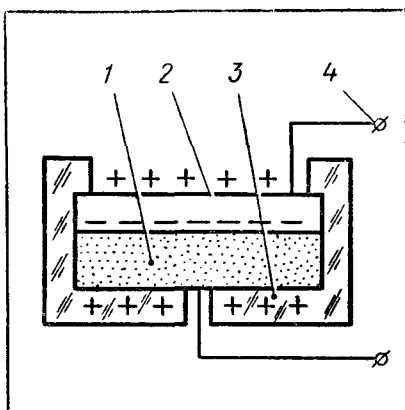


Рис. 70. Схема устройства конденсаторного микрофон-телефона:

1 — электрет; 2 — мембрана; 3 — корпус; 4 — выводы

В существовании электретных свойств оргстекла можно убедиться на простом опыте, схема которого изображена на рисунке 69. Соединим борны 1 электрофорной машины с двумя пластинами 3 и 5 плоского конденсатора. Одна из пластин конденсатора 5 закреплена неподвижно, а другая 3 подвешена над ней на пружине 2 малой жесткости. Расположим на нижней пластине лист стекла 4. При вращении дисков электрофорной машины пластины конденсатора приобретают разноименные заряды и верхняя пластина притягивается к нижней до соприкосновения со стеклом. Выдержав диэлектрик под напряжением 10—15 с, закоротим пластины конденсатора, сблизив борны 1 электрофорной машины до касания. При этом свободные заряды пластин конденсатора взаимно нейтрализуются, внешнее электрическое поле устраняется, и под действием пружины верхняя пластина отрывается от нижней.

Повторим опыт, поместив в конденсатор пластину оргстекла. Казалось бы, после выдержки под напряжением и последующем закорачивании пластина конденсатора должна возвратиться в исходное положение. Но, как показывает опыт, она довольно долго остается на поверхности оргстекла. Следовательно, закорачивание пластин конденсатора поляризации не устраняет. Оставшиеся связанные заряды оргстекла индуцируют на пластинах конденсатора заряды противоположного знака, которые и удерживают пластину.

Рассмотрим устройство конденсаторного микрофон-телефона, в котором электрическое поле создается электретом (рис. 70). При колебаниях мембраны зазор между мембраной и поверхностью электрета меняется. Это приводит к изменению емкости конденсатора мембрана — электрет. Изменение емкости конденсатора при постоянной величине заряда на его обкладках приводит к тому, что на выход-

ных контактах возникает переменное напряжение, частота которого равна частоте звуковых колебаний. Так это устройство работает в режиме микрофона, создавая от человеческого голоса средней громкости напряжение в несколько вольт на входном сопротивлении 1 МОм.

Нетрудно видеть, что конденсаторный микрофон — обратимое устройство, т. е. он может работать в режиме телефона. При изменениях потенциала мембрана в зависимости от знака заряда на ней либо притягивается к электрету, либо отталкивается от него, т. е. осуществляется преобразование электрических колебаний в механические.

Спонтанная поляризация. Если в ионном кристалле центры положительного и отрицательного зарядов ионов, расположенных в одной элементарной ячейке, не совпадают, то каждая элементарная ячейка такого кристалла может рассматриваться как диполь. До тех пор пока энергия взаимодействия между такими диполями превышает среднюю энергию теплового движения частиц, отдельные микроскопические области кристалла могут быть самопроизвольно, или, как принято говорить, спонтанно, поляризованными. В каждой из таких областей, называемых доменами, диполи элементарных ячеек ориентированы одинаково, но сами домены ориентированы хаотично. На поверхности кристалла чередуются положительно и отрицательно заряженные участки, и кристалл в целом не создает в окружающем пространстве электрического поля.

Сегнетоэлектрики. Кристаллы, обладающие в некотором температурном интервале спонтанной поляризацией, называются сегнетоэлектриками. Основные свойства сегнетоэлектриков впервые были изучены в 30-х годах советскими физиками И. В. Курчатовым и П. П. Кобецко на кристаллах сегнетовой соли. Впоследствии было открыто и исследовано около 80 сегнетоэлектриков. Наиболее интересным для практических применений является титанат бария $BaTiO_3$, открытый советским физиком Б. М. Вулом в 1944 г.



И. В. Курчатов

Внесение сегнетоэлектрика в электрическое поле приводит к тому, что в части его доменов все диполи ориентируются вдоль линий напряженности (рис. 71). При плавном увеличении напряженности электрического поля происходит поочередная ори-

ситуация одного домена за другим, т. е. поляризация возрастает не плавно, а скачками (эффект Баркгаузена). В достаточно сильном электрическом поле может быть завершена ориентация всех доменов. При уменьшении напряженности внешнего поля до нуля индуцированная поляризация в сегнетоэлектрике частично остается из-за того, что многие домены сохраняют созданную электрическим полем ориентацию. Для устранения остаточной поляризации в сегнетоэлектрическом образце его необходимо поместить в электрическое поле противоположного направления. Величина напряженности этого поля, необходимого для устранения остаточной поляризации, называется коэрцитивной силой. Для монокристаллов титаната бария коэрцитивная сила достигает величины $E_k \approx 10^5$ В/м.

Вследствие того что в сегнетоэлектриках происходит ориентация целых макроскопических областей — доменов, а не отдельных молекулярных диполей, как в полярных диэлектриках, сегнетоэлектрики обладают большой диэлектрической проницаемостью. Сегнетоэлектрические материалы, обладающие высокими значениями диэлектрической проницаемости, порядка 10^3 — 10^4 , применяются для изготовления малогабаритных конденсаторов.

Остаточная поляризация сегнетоэлектриков внешне не проявляется, так как поверхностные заряды нейтрализуются ионами из атмосферы и свободными носителями зарядов, имеющимися в каждом диэлектрике. Можно обнаружить только изменения остаточной поляризации.

Точка Кюри. Для сегнетоэлектриков характерно наличие предельной температуры — точки Кюри, выше которой тепловое движение нарушает ориентацию диполей в домене, спонтанная поляризация исчезает и сегнетоэлектрик становится обычным диэлектриком. Точка Кюри для титаната бария близка к 120°C . Переход через точку Кюри сопровождается резким изменением диэлектрической проницаемости. Это обусловлено тем, что при температуре Кюри происходит перестройка кристаллической структуры. Например, при температуре выше точки Кюри кристаллическая решетка титаната бария является идеальной кубической (рис. 72). Она обладает центром симметрии, совпадающим с положением иона титана Ti^{4+} . Центры положительного и отрицательного зарядов ионов в каждой ячейке совпадают.

При переходе через точку Кюри в сторону снижения температуры элементарные ячейки преобразуются. В одном из направлений

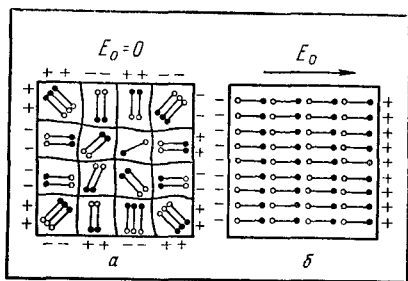


Рис. 71. Схема доменной структуры сегнетоэлектрика:

а — при отсутствии электрического поля;
б — в сильном электрическом поле

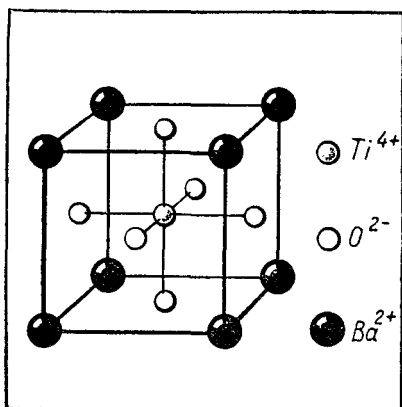


Рис. 72. Элементарная ячейка кристалла титаната бария

ребра становятся примерно на 1% длиннее, чем в двух других направлениях. Это дает возможность иону титана смещаться в сторону одного из шести окружающих его ионов кислорода. При этом элементарная ячейка становится электрическим диполем. Сильное взаимодействие между ионами соседних ячеек вызывает согласованное смещение ионов титана в одном направлении, что приводит к образованию домена — макроскопической области спонтанной поляризации.

Пьезоэлектрический эффект.

Если подвергнуть образец сегнетоэлектрика одностороннему сжатию вдоль направления остаточной поляризации, то размеры образца и каждой элементарной ячейки в этом направлении уменьшатся. При этом уменьшится расстояние между центрами положительного и отрицательного зарядов в каждой ячейке и остаточная поляризация образца в целом. В результате изменится разность потенциалов между гранями образца, перпендикулярными направлению действия силы. При растяжении

образца остаточная поляризация и соответствующая ей поверхностная плотность зарядов на гранях увеличатся, что приведет к возникновению разности потенциалов противоположного знака.

Явление возникновения поляризационных зарядов при деформации называется прямым пьезоэлектрическим эффектом. Оно было открыто в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри на несегнетоэлектрическом материале — кварце.

Все сегнетоэлектрики являются пьезоэлектриками, но далеко не все пьезоэлектрики обладают сегнетоэлектрическими свойствами.



П. Кюри

Количественно пьезоэффект характеризуется коэффициентом d , называемым пьезомодулем:

$$d = \frac{q}{F},$$

где q — возникший заряд, F — деформирующая сила.

Существует и обратный пьезоэффект — деформация пьезоэлектрика при помещении его в электрическое поле. Обратный пьезоэффект объясняется тем, что под действием электрического поля элементарные ячейки удлиняются или укорачиваются, а это приводит к макроскопической деформации образца. Величина деформации пропорциональна приложенной разности потенциалов и зависит от пьезомодуля. Прямой и обратный пьезоэффекты широко применяются в практике для преобразования механических колебаний в электрические и электрических в механические. Пьезоэлектрический элемент находится в головке современного электрофона для воспроизведения грамзаписи.

§ 36. СВОЙСТВА p — n -ПЕРЕХОДА

Полупроводники. Разделение материалов на проводники и диэлектрики является условным, так как в действительности не существуют материалы, совершенно лишенные свободных носителей электрических зарядов и обладающие бесконечно большим удельным электрическим сопротивлением. Более того, между диэлектриками и проводниками трудно установить четкую границу, так как в природе и технике встречаются материалы со всевозможными значениями удельных сопротивлений от величин порядка 10^{-8} Ом·м у типичных проводников до величин порядка 10^{17} Ом·м у типичных диэлектриков.

Многие вещества, не являющиеся хорошими проводниками электрического тока и непригодные вместе с тем для использования в качестве изоляторов, долгое время не находили себе применения в электротехнике и радиоэлектронике. Однако в последние десятилетия были открыты замечательные возможности применения на практике многих из этих веществ и материалов, получивших название полупроводников. К полупроводникам условно относятся материалы с удельным сопротивлением, лежащим при комнатных температурах в пределах 10^{-5} Ом·м $< \rho < 10^8$ Ом·м.

Характерными особенностями полупроводниковых материалов являются уменьшение их удельного сопротивления при нагревании и освещении, сильная зависимость удельного сопротивления от наличия примесей, существование особого типа проводимости, называемой дырочной проводимостью, возникновение на границе раздела полупроводниковых материалов с различным типом проводимости областей с особыми физическими свойствами.

p — n - переход. *Электронно-дырочный переход, или сокращенно p — n -переход, является внутренней границей, разделяющей*

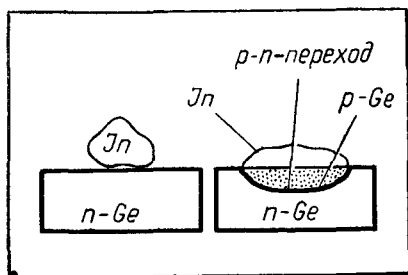


Рис. 73. Создание $p-n$ -перехода методом сплавления

области с дырочной (p) и электронной (n) проводимостями в одном и том же монокристалле. Создать $p-n$ -переход путем соприкосновения двух кристаллов с дырочной и электронной проводимостями невозможно вследствие различных несовершенств и загрязнений контактных поверхностей атомами адсорбированных газов и пленками окислов, сильно влияющими на свойства полупроводника.

Один из возможных способов получения $p-n$ -перехода заключается в том, что на поверхности монокристалла германия n -типа помещается крупинка индия и производится нагревание их до температуры $500-550^\circ\text{C}$ в вакууме или атмосфере водорода (рис. 73). Температура плавления германия 959°C . При нагревании до 500°C происходит растворение германия в расплавленном индии, а при последующем медленном охлаждении — кристаллизация германия с примесью индия. Поскольку германий с примесью индия имеет проводимость p -типа, то между ним и основным кристаллом образуется $p-n$ -переход.

Можно создать $p-n$ -переход в процессе роста кристалла при его вытягивании из расплава. Для этого в расплав сначала добавляют акцепторную, а затем донорную примесь.

При изучении процессов, протекающих на $p-n$ -переходе, удобно считать его образованным в результате идеального контакта двух частей монокристалла, обладающих проводимостями p - и n -типа. Преобладание концентрации электронов в n -полупроводнике приведет к тому, что с момента осуществления контакта через границу раздела будет происходить преимущественная диффузия электронов из n -полупроводника в p -полупроводник, где их концентрация меньше. Это приводит к появлению в электронном полупроводнике нескомпенсированных положительных ионов донорной примеси, в дырочном полупроводнике появляются нескомпенсированные заряды отрицательных ионов акцепторной примеси. В приконтактном слое n -полупроводника, потерявшего часть электронов, образуется положительный объемный заряд неподвижных ионизированных атомов донорных примесей, а в пограничном слое p -полупроводника — отрицательный объемный заряд неподвижных отрицательных ионов акцепторных примесей, обусловленный приходом электронов и уходом дырок в n -полупроводник (рис. 74).

Но процесс накопления объемного заряда не может происходить бесконечно. Дело в том, что появление объемного заряда нарушает электрическую нейтральность соприкасающихся полупроводников и приводит к возникновению приконтактного электрического поля

такого направления, что оно препятствует вызвавшему его переходам электронов из n - в p -полупроводник.

По мере накопления объемного заряда напряженность контактного поля возрастает и оно оказывает все большее противодействие переходам электронов из n - в p -полупроводник. В то же время контактное поле способствует встречным переходам неосновных носителей заряда, т. е. переходам электронов из p - в n -полупроводник.

Потенциал положительно заряженной области p -полупроводника выше потенциала заряженной области n -полупроводника. Поэтому в равновесном состоянии переход основных носителей требует совершения работы $A = eU_k$ против сил контактного электрического поля E_k .

Контактная разность потенциалов U_k на $p-n$ -переходе в германии составляет около 0,7 В, а в кремнии примерно 1,1 В. В связи с уходом значительной части свободных электронов из приконтактной области n -полупроводника в p -полупроводник n -полупроводник вблизи границы раздела практически превращается в диэлектрик с большим электрическим сопротивлением. С другой стороны, электроны, перешедшие в p -полупроводник, восполняют недостаток электронов у тех атомов германия, электроны которых были захвачены акцепторными атомами примеси. Поэтому эстафетные переходы валентных электронов от одного атома германия к другому, обеспечивающие так называемую дырочную проводимость в приконтактной области p -полупроводника, становятся невозможными. Это означает, что и пограничная область p -полупроводника практически превратилась в диэлектрик.

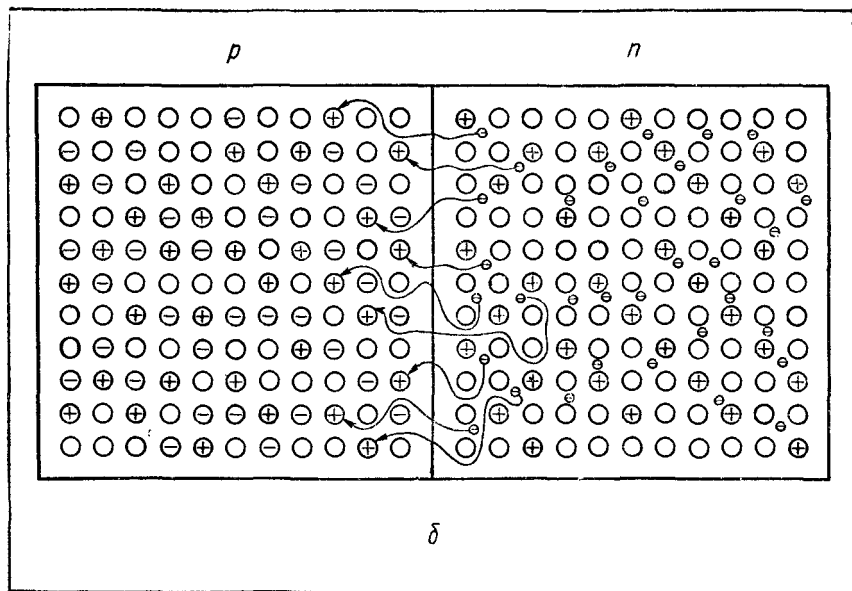
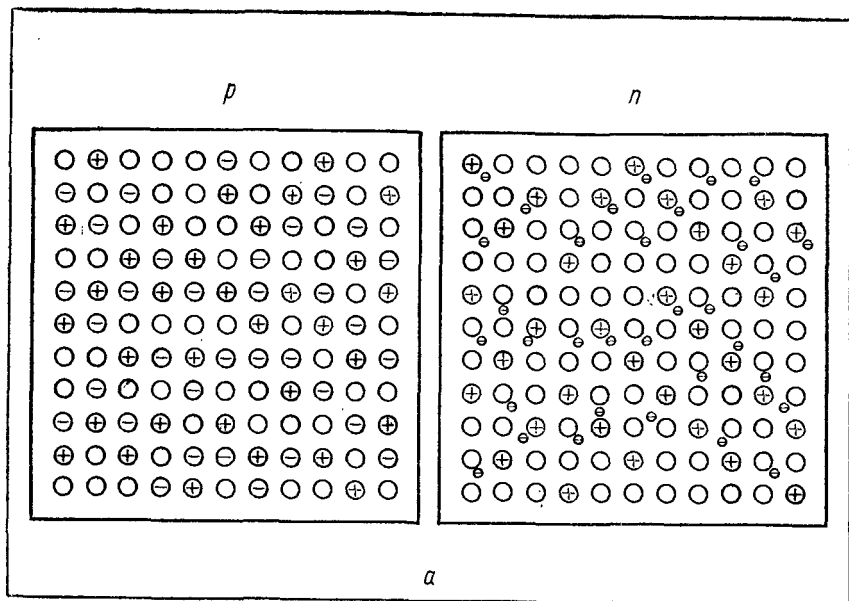
Таким образом, по обе стороны $p-n$ -перехода возникает слой, сопротивление которого значительно превышает сопротивление остальной части кристалла. Этот слой повышенного сопротивления называется запирающим слоем.

Но $p-n$ -переход не эквивалентен обычному резистору с большим сопротивлением. Во-первых, его сопротивление зависит от приложенного напряжения и, во-вторых, от направления приложенного электрического поля.

Выпрямительные свойства $p-n$ -перехода. Кристалл с $p-n$ -переходом обладает ценными свойствами. На одном из них — способности пропускать электрический ток в одном направлении — основано устройство диодов.

Если к кристаллу приложено внешнее напряжение U так, что плюс подан на n -область, а минус на p -область, то направления внешнего и контактного полей совпадают. Это приводит к увеличению скачка потенциала (теперь он становится равным $U_k + U$) и к увеличению ширины запирающего слоя.

Уширение запирающего слоя вызвано тем, что основные носители (электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике) удаляются внешним полем от запирающего слоя в разные стороны, увеличивая его толщину. Сопротивление $p-n$ -перехода возрастает, и через него потечет лишь небольшой ток I_0 неосновных но-



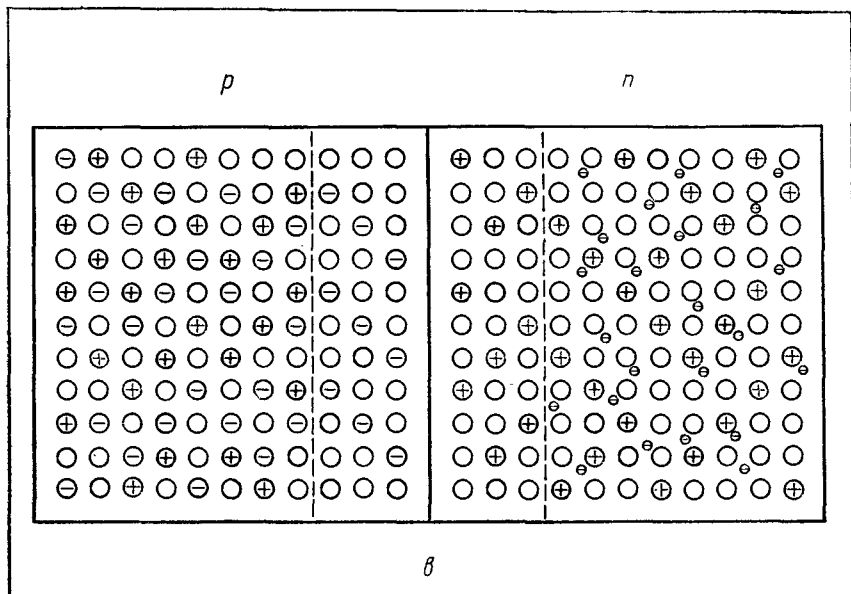


Рис. 74. Упрощенная схема образования $p - n$ -перехода на контакте электронного и дырочного полупроводников

сителей, называемый обратным током. Его величина практически не зависит от напряжения.

Если к кристаллу приложено внешнее напряжение U такой полярности, что направления внешнего и контактного полей взаимно противоположны, то уменьшение скачка потенциала на границе раздела полупроводников n - и p -типа на величину U приведет к тому, что переходы основных носителей через $p - n$ -переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг другу, основные носители входят в запирающий слой, уменьшая его толщину.

По мере увеличения внешнего напряжения толщина запирающего слоя стремится к нулю, а его удельное сопротивление уменьшается до величины, близкой к величине удельного сопротивления соприкасающихся полупроводников. Через кристалл течет так называемый прямой ток, значение которого определяется сопротивлением кристалла при отсутствии запирающего слоя, сопротивлением внешней цепи и приложенным напряжением. Прямой ток обусловлен главным образом встречным движением основных носителей, так как концентрация и число переходов неосновных носителей очень малы.

Итак, при подаче внешнего напряжения через $p - n$ -переход протекает ток большой величины при одном знаке внешнего напряжения и малый ток при другом. Говорят, что в первом случае $p - n$ -переход включен в пропускном, или прямом, направлении, а во втором — в запирающем, или обратном.

Способность $p-n$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в устройстве полупроводниковых диодов, преобразующих переменный ток в постоянный, точнее, в пульсирующий.

Важной характеристикой диода является коэффициент выпрямления — отношение прямого тока к обратному при напряжении 1 В. В хороших диодах коэффициент выпрямления велик, порядка 10^6 .

Достоинствами полупроводниковых диодов являются малые размеры и масса, длительный срок службы, высокая механическая прочность, высокий коэффициент полезного действия. К недостаткам их следует отнести чувствительность к перегрузкам и зависимость параметров от температуры. Полупроводниковые диоды не могут работать при температурах ниже -70°C (материал становится изолятором) и выше $+80^\circ\text{C}$ (германиевые) и $+125^\circ\text{C}$ (кремниевые). При более высоких температурах могут работать диоды на основе двуокиси титана ($+250^\circ\text{C}$), арсенида галлия ($+400^\circ\text{C}$) и карбида кремния ($+1000^\circ\text{C}$).

Термоэлектрические и фотоэлектрические свойства $p-n$ -перехода. Равновесное состояние $p-n$ -перехода может быть нарушено не только действием внешнего поля, но и повышением температуры, облучением быстрыми частицами и т. д. Если энергия, сообщаемая атомам любым из этих способов, достаточна для отрыва электронов от собственных атомов, то по обе стороны запирающего слоя возникнут электронно-дырочные пары. Появившиеся дырки и электроны проводимости, совершая тепловое движение, перемещаются в различных направлениях, в том числе и в направлении $p-n$ -перехода.

Основные носители (дырки в области p -полупроводника и электроны в области n -полупроводника), достигшие $p-n$ -перехода, не могут преодолеть его потенциальный барьер. Неосновные носители, дошедшие в результате диффузии до $p-n$ -перехода, свободно преодолевают его, так как контактное поле E_k способствует таким переходам. В результате этого в дырочном полупроводнике начнет возрастать концентрация дырок, а в электронном — электронов. Следовательно, p -область будет заряжаться положительно, а n -область — отрицательно, и между ними возникнет направленная противоположно U_k некоторая разность потенциалов U . Эту разность потенциалов в зависимости от вызвавшей ее причины называют термо- или фотоэлектродвижущей силой.

Накопление избыточных зарядов не может продолжаться беспрестанно, так как одновременно происходит понижение потенциального барьера на величину U и усиление встречной диффузии основных носителей — электронов из n -области в p -область и дырок в противоположном направлении. Установившемуся динамическому равновесию между числом носителей, проходящих $p-n$ -переход в обоих направлениях, будет соответствовать окончательный скачок потенциала $U_k - U$ (рис. 75). Таковы в общих чертах механизмы термоэлектрического и фотогальваниче-

ского эффектов на p — n -переходе, заключающихся в возникновении ЭДС при нагревании или освещении p — n -перехода.

С увеличением температуры или освещенности увеличивается число неосновных носителей заряда, накапливаемых по обе стороны p — n -перехода в результате разделения. Это вызывает понижение потенциального барьера на величину термо- или фотоэлектродвижущей силы. Величина термо- или фотоэлектродвижущей силы может достигать 1 В. Максимальное ее значение не может быть больше скачка потенциала U_k .

Устройства с p — n -переходом, предназначенные для преобразования теплоты или энергии света непосредственно в электрическую энергию, называются термо- или фотоэлементами.

Для получения большей ЭДС термо- или фотоэлементы соединяют в батарею последовательно, как обычные источники тока. Такие батареи называются соответственно термоэлектрическими генераторами и «солнечными батареями».

Явления возникновения термо- и фотоэлектродвижущей силы обратимы. Если направление тока через p — n -переход таково, что основные носители движутся навстречу друг другу, то при их рекомбинации вблизи p — n -перехода выделяется энергия, ранее затраченная на создание свободных электронов и дырок. Эта энергия может выделяться в виде тепла или света.

Если p — n -переход включен в цепь в запирающем направлении, т. е. так, что электроны и дырки расходятся в разные стороны от него, то, напротив, требуется энергия на создание электронов и дырок проводимости. При этом понижается энергия теплового движения атомов кристалла, т. е. происходит охлаждение p — n -перехода. На этом принципе работают полупроводниковые холодильники.

§ 37. ТРАНЗИСТОР

Устройство транзистора. Транзистор, или полупроводниковый триод, был изобретен сравнительно недавно, в 1951 г. По способу изготовления транзистор очень мало отличается от полупроводникового диода, но возможности его применения в современной электронике оказались несравненно более богатыми. Достаточно сказать, что в современных приборах и устройствах радиоэлектроники и вычислительной техники транзисторы пример-

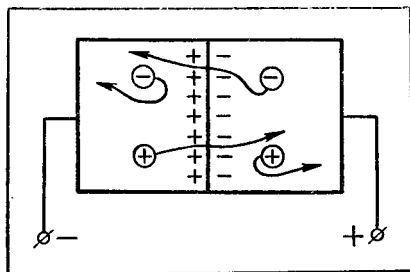


Рис. 75. Созданные светом или тепловым движением неосновные носители (электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике) разделяются контактным полем, заряжая p -полупроводник положительно, а n -полупроводник отрицательно

по наполовину заменили вакуумные лампы, так как их применение оказалось более выгодным.

Основой для изготовления транзистора, как и для изготовления полупроводникового диода, служит пластинка монокристалла германия или кремния площадью 2—4 мм² и толщиной около 100 мкм. Операция изготовления транзистора может быть подобной операции изготовления диода с тем лишь принципиальным отличием, что на кристаллы германия накладывается индий не с одной, а с двух сторон.

Если для изготовления транзистора использован монокристалл германия с электронной проводимостью, то после прогрева его в печи с двух сторон возникают области, обогащенные примесью атомов индия, проникших в германий при расплавлении. Эти области монокристалла германия становятся полупроводниками с дырочной проводимостью, а на границах соприкосновения их с основным кристаллом возникают два $p-n$ -перехода. Средняя область кристалла называется базой транзистора, а две крайние области кристалла, обладающие проводимостью противоположного базе типа, называются коллектором и эмиттером. Эмиттер и коллектор транзистора сплавного типа отличаются лишь размерами: диаметр коллектора примерно в 2 раза больше диаметра эмиттера.

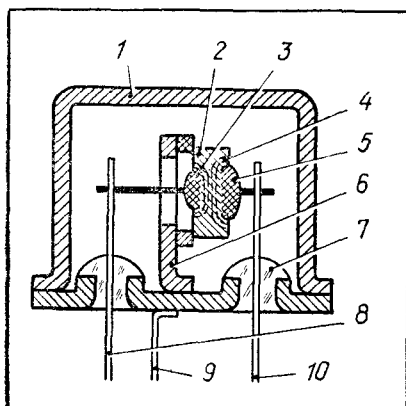


Рис. 76. Устройство сплавного транзистора:

1 — баллон транзистора; 2 — кристалл n -германия (база); 3 — эмиттер; 4 — коллектор; 5 — индиевый электрод; 6 — кристаллодержатель; 7 — стеклянные изоляторы; 8 — вывод эмиттера; 9 — вывод базы; 10 — вывод коллектора

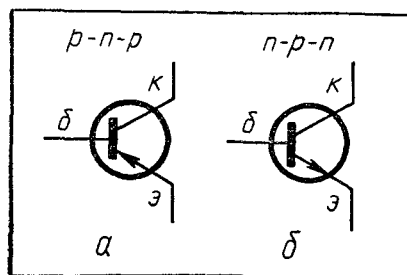


Рис. 77. Условные обозначения транзистора $p-n-p$ -типа и $n-p-n$ -типа

Устройство $p-n-p$ -транзистора сплавного типа показано на рисунке 76. Транзисторы $n-p-n$ -типа имеют аналогичное устройство, только материал базы в них обладает дырочной проводимостью, а коллектор и эмиттер — электронной. Условное обозначение транзисторов на схемах представлено на рисунке 77.

Включение транзистора в электрическую цепь. Для приведения в действие на коллектор транзистора типа $p-n-p$ подают напряжение отрицательной полярности относительно эмиттера. Напряжение

на базе может быть как положительным, так и отрицательным по отношению к эмиттеру. При использовании транзистора в любой электронной схеме два его электрода служат для введения входного сигнала и два для выведения выходного сигнала. Поскольку транзистор имеет всего три электрода, один из них обязательно используется дважды и оказывается общим для входной и выходной цепи.

Возможны три способа включения транзистора в электрическую цепь: с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором (рис. 78). Иногда вместо термина «общий» пользуются термином «заземленный». Все три способа включения транзистора находят применение в практических схемах.

Активное состояние транзистора. Основным рабочим состоянием транзистора в большинстве электрических схем является такое состояние, при котором к эмиттерному $p-n$ -переходу приложено напряжение в пропускном направлении, а к коллекторному — в запирающем направлении. В транзисторе $p-n-p$ -типа такое состояние возникает при подаче на базу отрицательного напряжения $U_{б-э}$, по абсолютной величине меньшего, чем коллекторное напряжение $U_{к-э}$.

Рассмотрим физические процессы, протекающие в транзисторе в активном состоянии. При подаче отрицательного напряжения на базу $p-n-p$ -транзистора эмиттерный $p-n$ -переход открывается и из эмиттера в базу переходят дырки. При изготовлении транзистора добиваются того, чтобы концентрация свободных электронов в базе была на 2—3 порядка меньше концентрации дырок в эмиттере, поэтому встречный поток электронов из базы в эмиттер можно не учитывать.

Поскольку коллекторный переход включен в запирающем направлении, сопротивление его значительно превышает сопротивление материала базы и падение напряжения на базе оказывается пренебрежимо малым. Практически полное отсутствие электрического поля в базе приводит к тому, что дырки, вошедшие в базу из эмиттера, далее перемещаются лишь за счет диффузии, распространяясь из области с высокой концентрацией вблизи эмиттера в область с низкой концентрацией, к коллектору. Так как концентра-

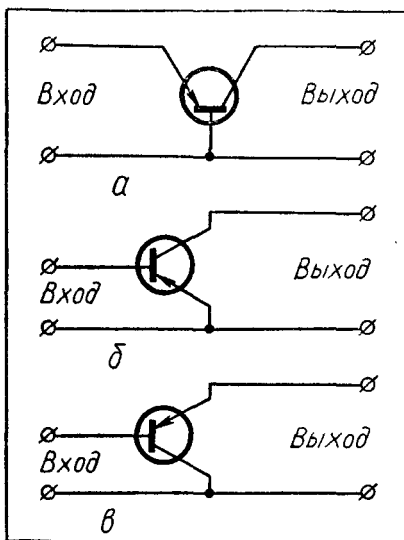


Рис. 78. Три способа включения транзистора в электрическую цепь:

а — с общей базой; б — с общим эмиттером; в — с общим коллектором

ция электронов в базе довольно низка, а толщина базы мала, большинство дырок успевают путем диффузии пересечь базу и достигнуть коллекторного $p - n$ -перехода, не встретившись ни с одним из электронов базы.

Положительный объемный заряд дырок, вошедших в базу из эмиттера, привлекает в базу такое количество электронов, основных носителей заряда в базе, которое полностью компенсирует положительный электрический заряд базы. Вхождение электронов в базу через базовый ввод совершается за 10^{-11} — 10^{-13} с, т. е. практически одновременно с входждением дырок из эмиттера. Диффузия дырок в базе сопровождается соответствующим изменением распределения концентрации электронов в базе, так что любой элемент объема базы остается электрически нейтральным.

Однако дальнейшая судьба дырок и электронов, достигших коллекторного перехода, оказывается различной. Все дырки, достигшие коллекторного $p - n$ -перехода, втягиваются его полем и переходят в коллектор. Электроны не могут преодолеть коллекторный $p - n$ -переход, так как для них напряжение в нем включено в заперном направлении.

При постоянном значении отрицательного напряжения на базе убыль дырок в базе за счет перехода их из базы в коллектор компенсируется диффузией равного количества дырок из эмиттера. При этом общее количество дырок в базе остается неизменным, ток электронов через базовый ввод должен отсутствовать. Такая картина наблюдалась бы в транзисторе в том случае, если бы рекомбинация дырок в базе совершенно не происходила.

В действительности же небольшая доля диффундирующих дырок (1—5%) встречает на своем пути через базу электроны и рекомбинирует. На место рекомбинировавших дырок в базу входит равное количество новых дырок из эмиттера. Убыль числа электронов в базе за счет рекомбинации восполняется входждением электронов через базовый ввод. Таким образом, ток, протекающий через эмиттерный вывод транзистора в активном состоянии $I_э$, оказывается равным сумме токов, протекающих через его коллекторный $I_к$ и базовый $I_б$ выводы: $I_э = I_к + I_б$.

Соотношение между токами коллектора и базы в транзисторе в активном состоянии определяется условиями диффузии и рекомбинации дырок в базе. Эти условия сильно зависят от типов использованных для изготовления транзистора материалов и конструкции его электродов, но очень слабо зависят от коллекторного и базового напряжений, сопротивлений, емкостей и индуктивностей, включенных в цепи базы, эмиттера и коллектора. В связи с этим транзистор можно рассматривать как устройство, распределяющее ток, протекающий через один из его электродов — эмиттер, в заданном соотношении между двумя другими электродами — базой и коллектором. Схема распределения тока в транзисторе в активном состоянии представлена на рисунке 79.

Усилительные свойства транзистора. Способность транзистора распределять ток эмиттера в заданном соотношении между коллектором и базой может быть использована для усиления электрических сигналов. Отношение изменения тока в цепи коллектора ΔI_k к изменению тока в цепи базы ΔI_b при постоянном напряжении на коллекторе для каждого транзистора есть величина постоянная, называемая интегральным коэффициентом передачи базового тока β :

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b}$$

Для транзисторов различных типов значение этого коэффициента лежит в пределах от 15—20 до 200—300. Следовательно, вызывая каким-то способом изменения тока в цепи базы транзистора, можно получить в десятки и даже в сотни раз большие изменения тока в цепи коллектора.

Используя параметр β , связь между током коллектора I_k и током базы I_b можно приближенно записать в виде

$$I_k = \beta I_b.$$

При включении транзистора по схеме с общим эмиттером отношение изменения тока коллектора ΔI_k к изменению тока базы ΔI_b равно отношению изменения выходного тока $\Delta I_{\text{вых}}$ к изменению входного тока $\Delta I_{\text{вх}}$. Это отношение называется коэффициентом усиления транзистора по току K_T :

$$K_T = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \beta.$$

Усиление электрических сигналов по току, напряжению и мощности не является обязательным свойством транзистора.

Так, при включении транзистора по схеме с общим эмиттером поступающий на его вход сигнал может быть усилен по

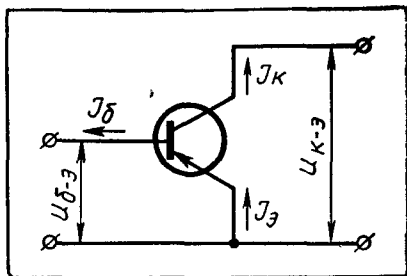


Рис. 79. Распределение токов в транзисторе в активном состоянии

коэффициентом пе-

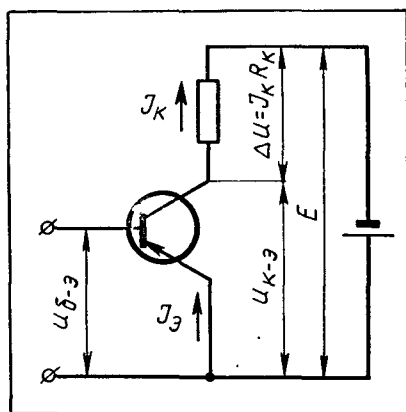


Рис. 80. Транзисторный усилительный каскад с общим эмиттером

напряжению при включении в цепь коллектора сопротивления R_H , значение которого должно быть рассчитано для каждого конкретного случая (рис. 80).

Включение нагрузочного сопротивления R_H в цепь коллектора в схеме с общим эмиттером приводит к зависимости напряжения на коллекторе $U_{к-э}$ от коллекторного тока I_k . Если напряжение источника питания E поддерживается постоянным, то эта зависимость оказывается линейной. Действительно, при любом значении тока коллектора I_k напряжение на коллекторе определится как разность между напряжением на выходе источника питания E и падением напряжения на сопротивлении R_H :

$$U_{к-э} = E - I_k R_H.$$

Изменение тока коллектора на некоторую величину ΔI_k приводит к изменению напряжения между выходными клеммами транзистора на величину

$$\Delta U_{вых} = \Delta I_k R_H.$$

Отношение этого изменения напряжения на выходных клеммах транзистора $\Delta U_{вых}$ к вызвавшему его изменению напряжения на входе $\Delta U_{вх}$ называется коэффициентом усиления каскада по напряжению:

$$K_H = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_k R_H}{\Delta I_0 R_{вх}} = \beta \frac{R_H}{R_{вх}}.$$

§ 38. МАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВИЖУЩИХСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

Электричество и магнетизм. Явления взаимного притяжения разноименных и отталкивания одноименных электрических зарядов во многом сходны с явлениями притяжения разноименных и отталкивания одноименных полюсов магнита. Однако многочисленные попытки ученых установить связь между электрическими и магнитными явлениями на протяжении многих столетий оставались безрезультатными.

Впервые эта связь была обнаружена в 1820 г. датским физиком Гансом Христианом Эрстедом, заметившим, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около нее. Явление, открытое Эрстедом, можно объяснить двумя различными способами. Можно предположить, как это и сделало большинство современников Эрстеда, что при пропускании тока проводник становится магнитом. Тогда взаимодействие тока с магнитом сводится по существу к магнитным взаимодействиям.

Возможность другого варианта объяснения была показана Ампером. В том же 1820 г. он установил, что электрический ток действует не только на магнитную стрелку, но и на другой электрический ток: два проводника, расположенные параллельно друг другу, испытывают взаимное притяжение при пропускании через них электрического тока в одном направлении и отталкиваются, если токи текут в противоположных направлениях. Явление взаимодействия электрических токов Ампер назвал **электродинамическим взаимодействием**.

Открытие электродинамического взаимодействия электрических токов многим современникам Ампера показалось малозначительным, почти само собой разумеющимся фактом. После сообщения о результатах своих опытов Ампер получил вопрос: «Но что же, собственно, нового в том, что Вы нам сказали? Само собой ясно, что если два тока оказывают действие на стрелку, то они оказывают действие также и друг на друга». Ампер не нашел сразу нужного ответа, но ему на помощь пришел Араго. Он вынул из кармана два

железных ключа и сказал: «Вот каждый из них тоже оказывает действие на стрелку, однако же они никак не действуют друг на друга». Те же ученые, которые понимали принципиальную важность открытия Ампера, считали его невероятным. Так, рассказывают, что Лаплас, присутствовавший на демонстрации опыта Ампера, по окончании лекции дождался его ассистента и спросил: «А не Вы ли это, молодой человек, подталкивали провод?»

На основании своих опытов Ампер пришел к выводу, что взаимодействие тока с магнитом можно объяснить, если предположить, что внутри магнита существуют незатухающие круговые токи. При этом взаимодействие магнита с током сводится к взаимодействию электрических токов.

Исторический путь открытия и исследования магнитных взаимодействий тесно связан с исследованием и использованием постоянных магнитов. Однако для выяснения физической сущности магнитных явлений не обязательно следовать этим долгим и трудным путем. В последующих параграфах мы рассмотрим магнитные явления, опираясь лишь на опыт Ампера, не прибегая к использованию сведений о постоянных магнитах.

Взаимодействие движущихся электрических зарядов. Взаимодействие двух точечных электрических зарядов q_1 и q_2 , находящихся в вакууме на расстоянии R друг от друга, описывается законом Кулона:

$$F_э = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2}. \quad (4.1)$$

Кажется очевидным, что при любом движении этих двух зарядов сила их взаимодействия на расстоянии R друг от друга должна определяться тем же самым выражением. Но в физике ни одно утверждение не принимается без экспериментального доказательства, каким бы очевидным оно ни казалось.

Для экспериментального исследования взаимодействия движущихся электрических зарядов используем в качестве прибора, создающего пучок быстро движущихся заряженных частиц, электронно-лучевую трубку осциллографа. Параллельно электронному пучку расположим проводник. Провод в целом электрически нейтрален, поэтому поднесение проводника к электронно-лучевой трубке не оказывает никакого влияния на движущиеся в ней электроны.

Теперь подключим проводник к источнику постоянного тока. В проводнике возникает упорядоченное движение электронов, но, как и в первом опыте, он остается электрически нейтральным. Опыт приводит к совершенно неожиданному результату: при пропускании электрического тока через проводник, расположенный параллельно оси электронно-лучевой трубки, светящаяся точка на экране осциллографа смещается из своего первоначального положения (рис. 81)! Смещение светового пятна на экране трубки свидетельствует о том, что траектория движения электронов в ней изменилась. Следовательно, при возникновении тока в проводнике на электроны,

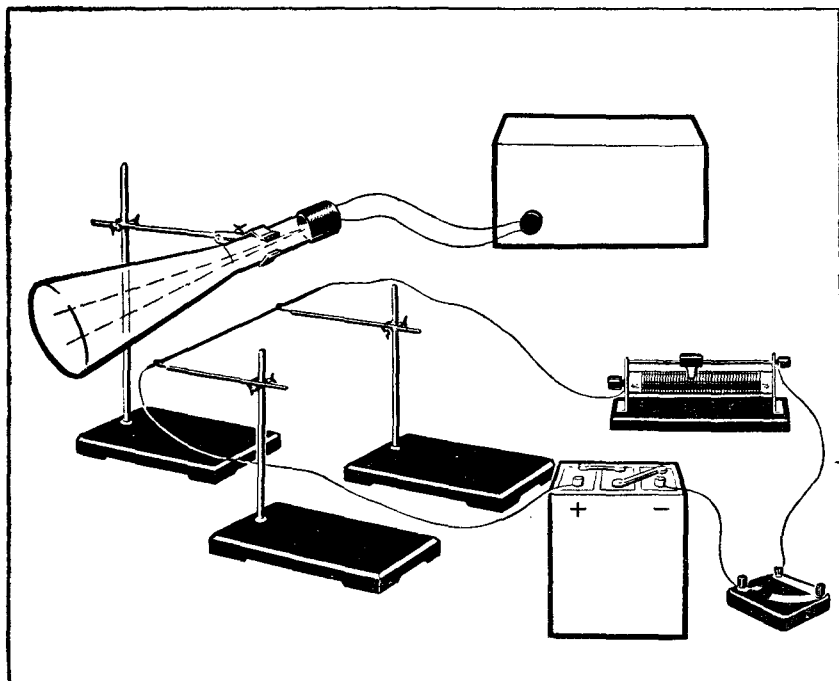


Рис. 81. Опыт с электронным пучком и проводником с током

движущиеся в электронно-лучевой трубке, действует какая-то сила.

Взаимодействие электрических зарядов, возникающее при их движении дополнительно к электрическому, назовем магнитным взаимодействием электрических зарядов. Основные закономерности магнитного взаимодействия электрических зарядов установим опытным путем.

Зависимость силы магнитного взаимодействия двух параллельно движущихся зарядов от расстояния между ними, скорости движения и величины электрических зарядов. Удаляя проводник с током от трубки, мы обнаруживаем, что смещение электронного луча уменьшается с увеличением расстояния между проводником и электронным лучом. Результаты тщательно выполненных опытов подобного рода позволяют сделать вывод, что сила магнитного взаимодействия движущихся электрических зарядов F_m обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними R :

$$F_m \sim \frac{1}{R^2}. \quad (4.2)$$

Исследовать зависимость силы магнитного взаимодействия от величины скорости движения зарядов можно путем изменения напря-

жения, разгоняющего электроны в трубке, и напряжения, приложенного к концам проводника.

Как показывает эксперимент, сила магнитного взаимодействия электрических зарядов прямо пропорциональна скорости движения каждого из них:

$$F_m \sim v_1 v_2. \quad (4.3)$$

Для установления зависимости силы магнитного взаимодействия от электрического заряда движущихся частиц могут быть использованы пучки однозарядных и многозарядных ионов, которые получаются примерно таким же способом, как и электронные пучки. Опыты с ионными пучками показывают, что сила магнитного взаимодействия прямо пропорциональна электрическим зарядам движущихся частиц:

$$F_m \sim q_1 q_2. \quad (4.4)$$

Объединив выражения (4.2), (4.3) и (4.4), получим:

$$F_m = k' \frac{q_1 q_2 v_1 v_2}{R^2}, \quad (4.5)$$

где k' — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения физических величин.

Мы получили, что сила магнитного взаимодействия электрических зарядов, движущихся параллельно, прямо пропорциональна зарядам q_1 и q_2 , скоростям их движения v_1 и v_2 и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними R .

§ 39. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов, как и электрическое взаимодействие, может быть описано двумя принципиально различными способами. Если принять представления теории дальнего действия, то любые два параллельно движущихся заряда q_1 и q_2 мгновенно взаимодействуют друг с другом по закону, описываемому выражением (4.5). Каким образом заряд q_1 «узнал» о существовании на расстоянии R от него заряда q_2 , о модуле и направлении скорости его движения и каким образом осуществилось между ними взаимодействие, эта теория ответить не может.

Согласно теории близкодействия магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов осуществляется следующим образом. Всякий движущийся электрический заряд создает в окружающем пространстве магнитное поле. Магнитное поле является формой материи. Характерными чертами магнитного поля являются непрерывность в пространстве и способность воздействовать на движущийся электрический заряд.

Магнитное действие движущегося заряда q_1 на заряд q_2 согласно теории близкодействия можно рассматривать как результат взаимодействия заряда q_2 с магнитным полем движущегося заряда q_1 .

Магнитное действие заряда q_2 на заряд q_1 рассматривается как результат взаимодействия заряда q_1 с магнитным полем движущегося заряда q_2 .

Силовая характеристика магнитного поля — индукция. Силовой характеристикой электрического поля является его напряженность \vec{E} :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_э}{q},$$

где $\vec{F}_э$ — сила, с которой действует электрическое поле на электрический заряд q , помещенный в данную точку. Зная напряженность электрического поля \vec{E} в данной точке, можно определить модуль и направление силы $\vec{F}_э$, действующей на неподвижный точечный заряд q , помещенный в эту точку:

$$\vec{F}_э = q\vec{E}.$$

Для описания силового воздействия со стороны магнитного поля на движущиеся электрические заряды вводится понятие магнитной индукции \vec{B} , аналогичное понятию напряженности электрического поля \vec{E} . Модуль вектора магнитной индукции определяется выражением:

$$B = \frac{F}{qv}, \quad (4.6)$$

где F — максимальное значение силы, действующей со стороны магнитного поля в данной точке на электрический заряд q , движущийся со скоростью v .

Необходимость такого сложного определения вызвана тем, что, как показывает опыт, сила магнитного взаимодействия электрических зарядов зависит не только от модуля вектора скорости движения заряда v , но и от его направления.

Направление вектора магнитной индукции. *Направление вектора магнитной индукции \vec{B} принимается перпендикулярным направлением вектора силы $\vec{F}_м$ его действия на движущийся положительный заряд и тому направлению вектора скорости \vec{v} электрического заряда, при котором эта сила имеет максимальное значение.* Пояснить данное определение вектора индукции может следующий способ обнаружения магнитного поля и определения направления вектора магнитной индукции \vec{B} .

Если необходимо узнать, есть ли магнитное поле в данной точке пространства, то в соответствии с выражением (4.6) необходимо пронаблюдать за движением электрических зарядов, пролетающих через эту точку. При наличии магнитного поля на электрические заряды в этой точке должна действовать сила, пропорциональная скорости их движения. В качестве прибора-индикатора магнитного поля для этой цели может быть использована электронно-лучевая

трубка, в которой под действием магнитного поля наблюдается изменение траектории движения пучка электронов и смещение светящегося пятна на экране.

Поворачивая электронно-лучевую трубку в пространстве до получения максимального смещения пучка электронов, можно определить направление вектора магнитной индукции \vec{B} . При максимальном смещении электронного луча сила магнитного взаимодействия \vec{F}_m имеет максимальное значение, следовательно, вектор скорости электронов \vec{v} при таком расположении трубки в пространстве перпендикулярен вектору магнитной индукции \vec{B} . Определив по направлению смещения луча направление силы магнитного взаимодействия \vec{F}_m , можно определить прямую, перпендикулярную векторам \vec{F}_m и \vec{v} , на которой расположен вектор \vec{B} . При движении положительного заряда вектор силы \vec{F}_m образует правую тройку с векторами \vec{v} и \vec{B} , т. е. он направлен в сторону движения винта с правой нарезкой, вращаемого в направлении от вектора \vec{v} к вектору \vec{B} через меньший угол (рис. 82). Для отрицательного заряда направление силы \vec{F}_m противоположно определяемому этим правилом.

Единица измерения магнитной индукции. Таким образом, модуль вектора магнитной индукции B в данной точке численно равен модулю силы, действующей на единичный положительный заряд, пролетающий через данную точку с единичной скоростью в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции \vec{B} .

Отсюда следует определение единицы магнитной индукции: за единицу измерения магнитной индукции \vec{B} в СИ принимается индукция такого поля, которое действует с силой 1 Н на положительный заряд в 1 Кл, движущийся со скоростью 1 м/с в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции \vec{B} .

Эта единица называется т е с л а (Т).

Из выражения (4.6) определим размерность новой физической величины:

$$1\text{Т} = \frac{1\text{Н}}{1\text{Кл} \cdot 1\text{м} \cdot \text{с}^{-1}} = \frac{1\text{Н}}{1\text{А} \cdot \text{с} \cdot 1\text{м} \cdot \text{с}^{-1}} = 1\text{Н} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{А}^{-1}.$$

Линии индукции магнитного поля. Из того экспериментально факта, что два одноименных

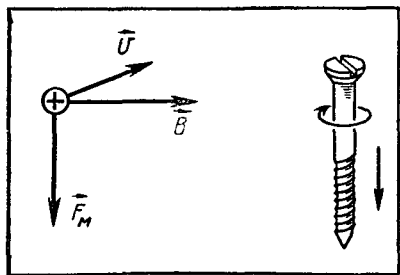


Рис. 82. Правая тройка векторов \vec{B} , \vec{v} и \vec{F}_m

электрических заряда при движении в параллельных направлениях притягиваются друг к другу силами магнитного взаимодействия, можно сделать вывод о направлении вектора индукции в любой точке вокруг движущегося заряда. Как видно из рисунка 83, в произвольной точке, лежащей на плоскости, проходящей через движущийся заряд q перпендикулярно вектору скорости \vec{v} , вектор индукции \vec{B} его магнитного поля оказывается лежащим в этой плоскости и перпендикулярным радиус-вектору, соединяющему движущийся заряд с данной точкой.

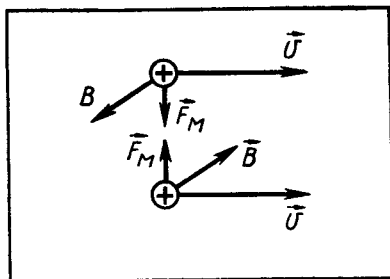


Рис. 83. Зная направление сил магнитного взаимодействия электрических зарядов и направление векторов их скоростей, можно определить направление векторов индукции магнитного поля

Линия, в любой точке которой вектор индукции \vec{B} направлен по касательной к ней, называется линией индукции. Линии индукции движущегося электрического заряда — это окружности с центрами, лежащими на прямой, заданной вектором его скорости \vec{v} (рис. 84). Если вектор магнитной индукции \vec{B} в любой точке пространства имеет одинаковое направление и одну и ту же величину, то магнитное поле называется однородным.

Магнитный поток. Примем, что поверхность площадью 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору магнитной индукции \vec{B} , пронизывает число линий индукции, равное модулю вектора индукции B . Тогда число линий индукции, проходящих через поверхность площадью S , расположенную перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, равно:

$$\Phi = BS.$$

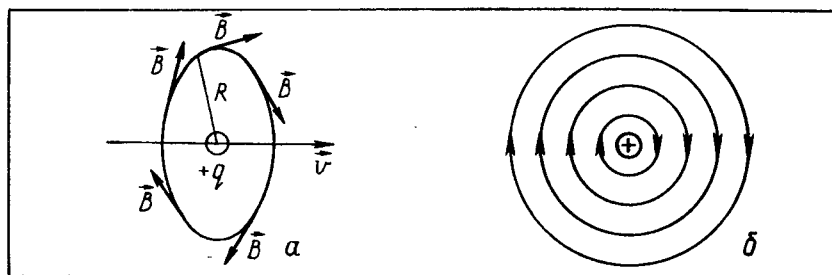


Рис. 84. Линии индукции магнитного поля движущегося заряда

Физическая величина Φ , определенная последним выражением, называется магнитным потоком.

Единица измерения магнитного потока в СИ — вебер (Вб).

Магнитный поток в 1 Вб приравывают поверхности площадью в 1 м^2 , расположенную перпендикулярно вектору \vec{B} в однородном поле с магнитной индукцией 1 Т.

§ 40. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Сила магнитного взаимодействия электрических зарядов q_1 и q_2 , движущихся параллельно со скоростями v_1 и v_2 на расстоянии R друг от друга, определяется выражением (4.5):

$$F_m = k' \frac{q_1 q_2 v_1 v_2}{R^2}. \quad (4.5)$$

Это явление мы можем рассматривать как взаимодействие движущегося заряда q_1 с магнитным полем, созданным движущимся зарядом q_2 . Тогда сила F_m , действующая на заряд q_1 со стороны магнитного поля, созданного зарядом q_2 , определится согласно выражению (4.6):

$$F_m = q_1 v_1 B_2, \quad (4.7)$$

где B_2 — индукция магнитного поля, созданного движущимся зарядом q_2 . Сравнивая выражения (4.5) и (4.7), можно получить:

$$B_2 = k' \frac{q_2 v_2}{R^2}. \quad (4.8)$$

Выражение (4.8) показывает, что магнитная индукция в плоскости, проходящей через электрический заряд q перпендикулярно вектору его скорости \vec{v} , прямо пропорциональна заряду q , его скорости v и обратно пропорциональна квадрату расстояния до заряда R :

$$B = k' \frac{qv}{R^2}, \quad (4.9)$$

где k' — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц измерения физических величин.

Способ нахождения магнитной индукции в любой точке, находящейся на расстоянии R от электрического заряда в направлении под углом α к вектору скорости \vec{v} его движения, вытекает из следующих рассуждений.

Вектор магнитной индукции в плоскости, перпендикулярной вектору скорости движущегося заряда, в любых двух точках, расположенных симметрично относительно заряда, имеет противоположные направления. Отсюда можно сделать вывод, что на прямой, вдоль которой движется электрический заряд, индукция создаваемого им магнитного поля равна нулю.

Для нахождения магнитной индукции движущегося заряда в произвольной точке A разложим вектор скорости заряда на две составляющие. Направление первой составляющей \vec{v}_1 выбираем совпадающим с направлением от заряда на точку A ; направление второй составляющей \vec{v}_2 выбираем перпендикулярным первому направлению. Представляя движение заряда со скоростью \vec{v} относительно точки A как сумму двух движений со скоростями \vec{v}_1 и \vec{v}_2 , мы можем определить магнитную индукцию поля, создаваемого зарядом q в точке A .

Так как на прямой, вдоль которой происходит движение заряда, индукция магнитного поля равна нулю, движение заряда q со скоростью \vec{v}_1 не создает магнитного поля в точке A (рис. 85). Движение заряда со скоростью \vec{v}_2 приводит к возникновению магнитного поля в точке A с индукцией, определяемой выражением (4.9):

$$B = k' \frac{qv_2}{R^2}. \quad (4.10)$$

Так как

$$v_2 = v \sin \alpha,$$

то выражение (4.10) для определения индукции магнитного поля, создаваемого электрическим зарядом q на расстоянии R от него в направлении под углом α к вектору скорости \vec{v} , можно записать в виде

$$B = k' \frac{qv}{R^2} \sin \alpha. \quad (4.11)$$

§ 41. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА В ВАКУУМЕ

Закон Био — Савара — Лапласа. Если известно выражение, определяющее вектор индукции магнитного поля, создаваемого одним движущимся электрическим зарядом (4.11), то задача нахождения индукции магнитного поля, создаваемого электрическим током в проводнике любой формы, должна быть в принципе разрешимой. Для решения такой задачи необходимо определить индукцию \vec{B}_1 магнитного поля, созданного в данной точке первым зарядом q_1 , участвующим в создании электрического тока в проводнике, затем индукцию \vec{B}_2 магнитного поля,

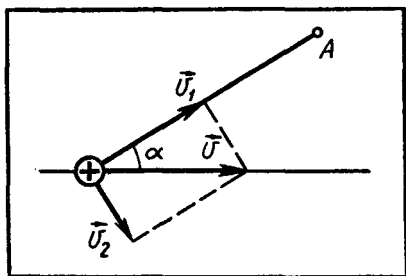


Рис. 85. Индукция магнитного поля движущегося электрического заряда в данной точке зависит от расстояния до этой точки и направления вектора скорости

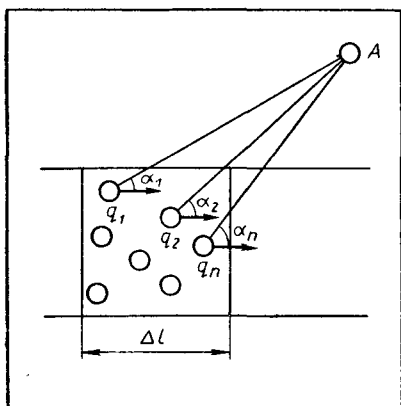


Рис. 86. Индукцию магнитного поля проводника с током можно найти как сумму векторов индукции отдельных зарядов, создающих электрический ток

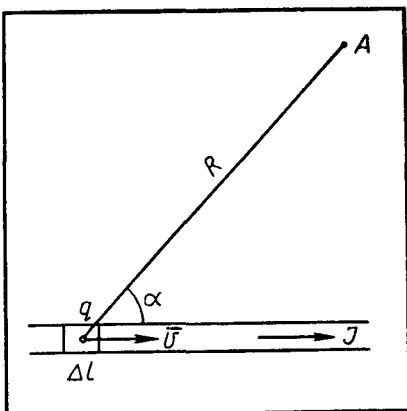


Рис. 87. Элемент проводника с током можно рассматривать как движущийся электрический заряд

созданного в той же точке зарядом q_2 , и т. д. для всех остальных электрических зарядов до последнего n -го. Вектор индукции \vec{B} магнитного поля тока в данной точке A может быть найден как геометрическая сумма векторов магнитной индукции всех электрических зарядов, участвующих в создании электрического тока в проводнике (рис. 86):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Разумеется, расчеты никогда не выполняются буквально таким способом. Решение задачи о нахождении индукции магнитного поля проводника с током можно упростить следующим образом.

Рассмотрим прямолинейный элемент проводника длиной Δl , в котором протекает электрический ток I (рис. 87). Так как за малый интервал времени Δt свободные заряды в проводнике, движущиеся со скоростью упорядоченного движения \vec{v} , переместятся на расстояние $\Delta l = v \cdot \Delta t$, а количество заряда, протекшего за то же время через поперечное сечение проводника, равно: $q = I \cdot \Delta t$, то количество свободных зарядов в элементе проводника длиной Δl равно:

$$q = I \cdot \Delta t = I \frac{\Delta l}{v}. \quad (4.12)$$

Если длина прямолинейного элемента проводника Δl мала по сравнению с расстоянием R от него до точки, в которой определяется индукция магнитного поля тока, протекающий в нем ток I можно рассматривать как электрический заряд q , движущийся со скоростью \vec{v} . Индукция магнитного поля от этого элемента проводника с током

согласно выражениям (4.11) и (4.12) в точке A на расстоянии R от элемента проводника в направлении под углом α к нему равна:

$$B = k' \frac{qv}{R^2} \sin \alpha = k' \frac{I \Delta l}{R^2} \frac{v}{v} \sin \alpha = k' \frac{I \Delta l}{R^2} \sin \alpha. \quad (4.13)$$

Это выражение было найдено Лапласом на основании анализа результатов, полученных Био и Саваром при экспериментальном исследовании магнитных полей с током и носит название з а к о н а Б и о — С а в а р а — Л а п л а с а.

Магнитная индукция кругового тока и бесконечного прямого тока. Используя закон Био — Савара — Лапласа, можно вычислить индукцию магнитного поля, создаваемого при прохождении тока через проводники любых размеров и форм. В практикуме по решению задач к этой главе найдено выражение, с помощью которого можно вычислить индукцию магнитного поля, создаваемого круговым током I радиусом R в центре круга (задача 42):

$$B = 2\pi k' \frac{I}{R}. \quad (4.14)$$

Индукция магнитного поля на расстоянии R от бесконечного прямого проводника с током I определяется выражением:

$$B = k' \frac{2I}{R}. \quad (4.15)$$

§ 42. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЕСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ

Если известны направление и модуль вектора индукции магнитного поля \vec{B} , то силу магнитного взаимодействия \vec{F}_m электрического заряда q , движущегося со скоростью \vec{v} , с электрическими зарядами, создающими это магнитное поле, можно определить, не зная ни величины зарядов, создающих магнитное поле, ни их скоростей и положения в пространстве.

Опыт показывает, что при произвольной ориентации векторов \vec{v} и \vec{B} магнитное поле действует на электрический заряд q с силой \vec{F}_m , направленной перпендикулярно векторам \vec{v} и \vec{B} и определяемой выражением:

$$F_m = qvB \sin \alpha, \quad (4.16)$$

где α — угол между векторами индукции \vec{B} магнитного поля и скорости \vec{v} электрического заряда (рис. 88).

Закон Ампера. Для нахождения силы F_m , действующей в магнитном поле на элемент прямого проводника с током I длиной Δl , нужно определить сумму сил, действующих на отдельные

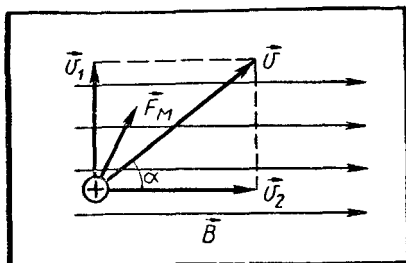


Рис. 88. Сила магнитного взаимодействия зависит от угла между вектором индукции магнитного поля и вектором скорости движения заряда

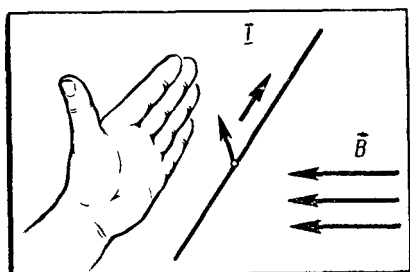


Рис. 89. Правило левой руки

элемента проводника. Используя известное выражение силы тока в проводнике $I = enSv$, можно выразить силу магнитного взаимодействия элемента проводника с током через величину силы тока в проводнике I , его длину Δl и индукцию магнитного поля B в том месте, где расположен элемент проводника с током:

$$F = I \Delta l B \sin \alpha, \quad (4.18)$$

где α — угол между элементом проводника и вектором индукции \vec{B} . Это выражение называется законом Ампера.

Направление вектора силы Ампера \vec{F} можно определить, пользуясь правилом левой руки: если расположить левую руку так, чтобы выпрямленные четыре пальца указывали направление тока в проводнике, а плоскость ладони поставить перпендикулярно плоскости, проходящей через векторы \vec{B} и \vec{v} таким образом, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь, то отогнутый в плоскости ладони большой палец укажет направление вектора силы Ампера \vec{F} (рис. 89).

Используя выражения (4.15) и (4.18), можно определить силу действия магнитного поля бесконечного прямого проводника с

движущиеся электрические заряды в этом элементе проводника. Будем считать, что все электроны в проводнике движутся с одинаковыми скоростями упорядоченного движения \vec{v} и вектор индукции магнитного поля \vec{B} имеет одинаковое значение по модулю и направлению по всей длине элемента проводника. Тогда полную силу F действия магнитного поля на элемент проводника с током можно найти умножением величины силы F_m , действующей на один электрон, на число электронов, которые принимают участие в создании электрического тока в элементе проводника Δl :

$$F = F_m N = evB \sin \alpha n S \Delta l, \quad (4.17)$$

где n — концентрация свободных электронов в проводнике, S — площадь поперечного сечения проводника, Δl — длина элемента

током I_2 на элемент проводника с током I_1 длиной Δl на расстоянии R :

$$F = I_1 \cdot \Delta l B_2 \sin \alpha = I_1 \cdot \Delta l k' \frac{2I_2}{R} \sin \alpha. \quad (4.19)$$

В случае взаимодействия параллельных проводников угол равен 90° и выражение (4.19) принимает вид:

$$F = 2k' \frac{I_1 I_2 \cdot \Delta l}{R}. \quad (4.20)$$

§ 43. МАГНИТНАЯ ПОСТОЯННАЯ ВАКУУМА

Определение коэффициентов k' и μ_0 . Магнитное взаимодействие проводников с током используется для определения единицы силы тока в СИ. Согласно определению ампер — сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Подставляя в выражение (4.20) значение $R = 1$ м, $\Delta l = 1$ м, $I_1 = I_2 = 1$ А и $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Н, получим величину коэффициента k' в СИ:

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} = 2k' \frac{1\text{А}^2 \cdot 1\text{м}}{1\text{м}}; \quad k' = 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}. \quad (4.21)$$

Однако вместо коэффициента k' в СИ обычно используется коэффициент μ_0 , называемый магнитной постоянной в а к у у м а:

$$\mu_0 = 4\pi k' = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2}. \quad (4.22)$$

Расчетные формулы. Заменяв постоянную k' в выражениях (4.5), (4.11), (4.14), (4.13), (4.15), (4.20) магнитной постоянной вакуума μ_0 , можно получить в новом виде формулы для расчета силы магнитного взаимодействия электрических зарядов, движущихся параллельно:

$$F_m = \mu_0 \frac{q_1 q_2 v_1 v_2}{4\pi R^2}, \quad (4.23)$$

индукции магнитного поля движущегося электрического заряда:

$$B = \mu_0 \frac{qv}{4\pi R^2} \sin \alpha, \quad (4.24)$$

закона Био — Савара — Лапласа:

$$B = \mu_0 \frac{I \Delta l}{4\pi R^2} \sin \alpha, \quad (4.25)$$

индукции магнитного поля в центре кругового тока:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}, \quad (4.26)$$

индукции бесконечного прямого проводника с током:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}, \quad (4.27)$$

силы магнитного взаимодействия прямолинейных параллельных проводников с током:

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2 \cdot \Delta l}{2\pi R}. \quad (4.28)$$

К этим формулам добавим без вывода формулу для расчета индукции магнитного поля внутри соленоида, длина которого значительно превосходит радиус витка его обмотки:

$$B = \mu_0 nI, \quad (4.29)$$

где n — число витков на единицу длины соленоида. У конца длинного соленоида индукция магнитного поля в 2 раза меньше, чем внутри соленоида:

$$B = \mu_0 \frac{nI}{2}. \quad (4.30)$$

§ 44. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Превращение механической энергии в электрическую. Возникновение разности потенциалов на концах проводника, движущегося в магнитном поле, дает возможность использовать это явление для получения электрического тока. По такому принципу действуют промышленные генераторы электроэнергии на тепловых, ядерных и гидроэлектростанциях. В них поступательное движение проводников заменено более удобным вращательным.

Откуда же берется энергия для разделения зарядов и появления ЭДС в генераторе? Ведь магнитное поле не совершает работы над движущимися зарядами, так как работа силы \vec{F}_m , всегда перпендикулярной вектору скорости, равна нулю. Работа по разделению зарядов в движущихся проводниках электромагнитного генератора на тепловых электростанциях производится за счет механической энергии пара, давящего на лопатки паровой турбины, на гидроэлектростанциях эта работа совершается за счет механической энергии воды, вращающей гидротурбины, имеющие общий вал с генератором. В этом процессе магнитное поле является только посредником, вызывающим разделение зарядов. Не сила \vec{F}_m , действующая со стороны магнитного поля, выполняет роль сторонней силы, а силы, приводящие во вращение ротор генератора.

Самые мощные в мире генераторы электроэнергии изготавливаются и используются в нашей стране.

МГД-генератор. Наиболее распространенный способ получения электроэнергии на тепловых электростанциях довольно сложен. Сначала топливо сжигается в топке парового котла, и получается пар. Затем пар направляется на лопатки турбины и приводит ее в действие. Наконец электромеханический генератор превращает полученную от турбины механическую энергию в энергию электрического тока. На каждом из этапов преобразования одного вида энергии в другой происходят значительные потери энергии. В результате КПД тепловых электростанций обычно не превышает 35—40%. Это значит, что около 60—65% угля, нефти или газа сжигается в топках впустую.

Так как КПД любой тепловой машины в идеальном случае не превышает величины

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 — температура нагревателя, а T_2 — температура холодильника, то важнейшей задачей при разработке новых способов преобразования энергии является повышение температуры рабочего тела.

Значительного повышения температуры рабочего тела удается добиться в магнитогидродинамических генераторах электроэнергии, сокращенно называемых МГД-генераторами.

Схема устройства МГД-генератора показана на рисунке 90. В камере сгорания при сжигании нефти, керосина или природного газа создается высокая температура (2000—3000 К), при которой газообразные продукты сгорания ионизируются, образуя электронно-ионную плазму. Для повышения электропроводности плазмы в камеру сгорания вводят легкоионизирующиеся вещества: кальций, натрий, цезий. Раскаленная плазма движется по расширяющемуся каналу длиной в несколько метров, в котором ее внутренняя

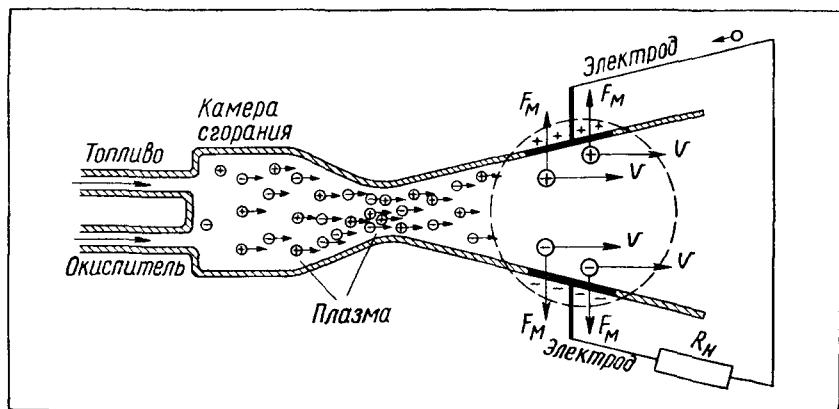


Рис. 90. Схема устройства МГД-генератора

энергия превращается в кинетическую энергию и скорость возрастает до 2000 м/с и более. Так же как и металлический проводник, плазма в целом нейтральна, но, влетая в область сильного магнитного поля, составляющие ее частицы разных знаков под действием силы F_m разделяются, как показано на рисунке 90. Электроны, достигнув нижнего электрода, движутся во внешней цепи по сопротивлению нагрузки R_n к другому электроду, где нейтрализуют положительтельные ионы. Мощность, выделяемая во внешней цепи, может быть использована для различных практических нужд.

В режиме холостого хода, когда внешняя цепь разомкнута ($R_n = \infty$), между электродами возникает наибольшая разность потенциалов, равная ЭДС. В зависимости от конструкции генератора она может достигать нескольких сотен или тысяч вольт.

В МГД-генераторе сильно нагрета только плазма и отсутствуют движущиеся детали, подвергаемые, подобно лопаткам турбин, одновременному воздействию больших механических напряжений и высоких температур. Возможность использовать огнеупорные материалы и применять охлаждение неподвижных металлических деталей, соприкасающихся с плазмой, позволяет повысить температуру рабочего тела, а значит, и КПД установки. Для температуры плазмы, равной на входе $T_1 = 2500$ К, а на выходе $T_2 = 300$ К, теоретическое значение КПД составляет примерно 90%. Однако в реальных условиях температура отработанных газов на выходе из канала больше 300 К. Но если отработанные и уже не ионизированные продукты сгорания использовать для получения пара и приведения в действие турбины обычного электромашинного генератора, то реальный КПД всей такой установки будет равен 50—60%. А это почти вдвое превышает реальный КПД тепловых электростанций. Следовательно, при том же расходе топлива с помощью МГД-генераторов можно получить вдвое больше электроэнергии.

Еще одним преимуществом МГД-генераторов является то, что они могут развивать полную мощность, измеряемую сотнями миллионов ватт, всего за несколько секунд после запуска. Поэтому МГД-генераторы выгодно применять как резервные источники электроэнергии на случай резкого увеличения потребления энергии в энергосистемах.

Высокий КПД, простота конструкции, малые габариты МГД-генераторов при большой мощности позволяют надеяться, что с преодолением их основного недостатка — сравнительно небольшого срока службы, вызванного износом стенок сопла, — они начнут широко применяться для получения электроэнергии в промышленных масштабах.

Первая опытно-промышленная электростанция с МГД-генератором мощностью 25 000 000 Вт была запущена в нашей стране в 1971 г.

§ 45. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Сила Лоренца. До сих пор мы рассматривали действие электрических и магнитных полей на электрические заряды лишь в отдельности. Опыт показывает, что при одновременном воздействии на движущийся электрический заряд q электрического и магнитного полей сила \vec{F}_L , действующая на электрический заряд, равна векторной сумме сил $\vec{F}_э$ и $\vec{F}_м$:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_э + \vec{F}_м = q\vec{E} + q(\vec{v} \sin \alpha).$$

Эта сила \vec{F}_L взаимодействия электрических зарядов, учитывающая существование электрического и магнитного полей, называется силой Лоренца.

Электромагнитное поле. Может показаться, что описание взаимодействия электрических зарядов с помощью введения понятий электрического и магнитного полей дает разные результаты при выборе различных инерциальных систем отсчета, так как магнитная составляющая силы Лоренца зависит от скорости движения электрического заряда. Однако это не так.

Дело в том, что при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую изменяется не только магнитная составляющая $\vec{F}_м$ силы Лоренца \vec{F}_L , но и ее электрическая составляющая $\vec{F}_э$. Причиной изменения напряженности электрического поля \vec{E} при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую является возникновение наряду с электростатическим полем неподвижных зарядов индукционного электрического поля. В результате, хотя каждое из полей, электрическое и магнитное, изменяется при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую, их совместное действие на электрические заряды оказывается одинаковым в любой инерциальной системе отсчета.

Тот факт, что относительны не только значения напряженности и индукции электрического и магнитного полей, но и само их существование, а совместное действие на электрические заряды оказывается не зависящим от выбора инерциальной системы отсчета, заставляет сделать вывод, что в природе не существуют электрические и магнитные поля как самостоятельные материальные объекты. Существует лишь единое электромагнитное поле, действие которого на электрический заряд определяется выражением:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_э + \vec{F}_м.$$

Это выражение позволяет условно разделять электромагнитное поле на два самостоятельных — электрическое и магнитное. Такое условное разделение в настоящее время оправдывается лишь упрощением объяснений ряда явлений и расчетов при умелом выборе соответствующей системы отсчета.

§ 46. ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

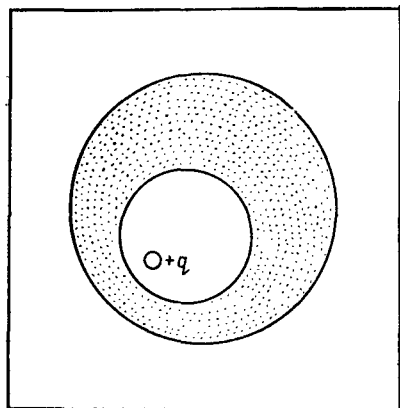


Рис. 91. К задаче 38

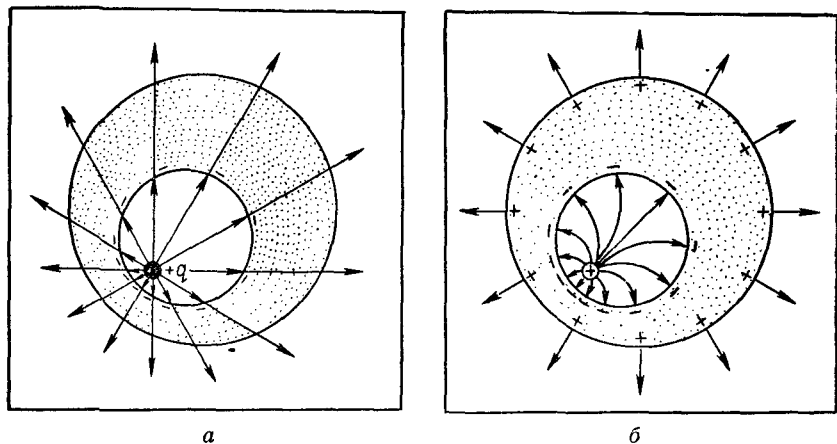
Задача 38. Внутри сферической полости в незаряженном металлическом шаре радиусом R помещается положительный электрический заряд $+q$ (рис.91).

Определите электрический заряд на поверхности полости, потенциал поверхности шара и напряженность электрического поля у поверхности шара. Сделайте рисунки распределения линий напряженности электрического поля внутри полости и вне проводящего шара.

Решение. При внесении заряда $+q$ внутрь полости его электрическое поле действует на положительные и отрицательные электрические заряды, имеющиеся в проводящем шаре. Перемещение свободных электрических зарядов будет происходить до тех пор, пока напряженность поля в любой точке внутри проводника не станет равной нулю, так как только при этом условии свободные электрические заряды не будут иметь упорядоченного движения.

В данном случае напряженность электрического поля в проводнике может стать равной нулю, если на внутренней поверхности полости в результате перемещения свободных зарядов появится избыточный отрицательный заряд. Заряд $+q$ находится не в центре полости и создает в различных местах проводника вблизи поверхности полости электрическое поле с различной напряженностью. Так как напряженность поля, создаваемого зарядами на поверхности, пропорциональна поверхностной плотности зарядов, то для нейтрализации поля заряда $+q$ в проводнике поверхностная плотность отрицательных зарядов на поверхности полости должна быть различной. Это наглядно представлено на рисунке 92, а, где изображены линии напряженности поля точечного заряда $+q$ и индуцированные этим полем отрицательные заряды на поверхности сферической полости. Однако на этом рисунке не изображены линии напряженности индуцированных электрических зарядов.

Вместо того чтобы изображать сложную картину наложения электрических полей всех зарядов, представим качественную картину распределения линий напряженности результирующего электрического поля. Линии напряженности электрического поля любой системы неподвижных зарядов перпендикулярны поверхности проводника, так как в противном случае под действием составляющей вектора напряженности, направленной вдоль поверхности, происходило бы движение свободных зарядов. Учитывая это свойство



а

б

Рис. 92. К решению задачи 38

проводников, а также зная картину распределения поверхностной плотности наведенных электрических зарядов (рис. 92, а), можно представить распределение линий напряженности электрического поля внутри полости рисунком 92, б. Так как внутри проводника напряженность электрического поля равна нулю, то все линии напряженности, выходящие из положительного заряда $+q$, кончаются на отрицательных зарядах, индуцированных на поверхности полости.

Суммарный отрицательный заряд поверхности полости можно определить, применив теорему Гаусса к замкнутой поверхности, проходящей всюду внутри проводника и охватывающей полость.

Так как напряженность электрического поля в любой точке внутри проводника равна нулю, то полный поток вектора напряженности электрического поля через эту поверхность также равен нулю: $\Phi = 0$. Так как $\Phi = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0}$, суммарный заряд внутри

этой поверхности равен нулю, следовательно, на поверхности полости индуцируется суммарный электрический заряд, равный внесенному заряду $+q$ по величине и противоположный ему по знаку.

Концентрация отрицательного заряда $-q$ на поверхности полости приводит к тому, что в проводнике остается нескомпенсированный положительный электрический заряд $+q$.

Взаимное отталкивание одноименных электрических зарядов приводит к их взаимному вытеснению на поверхность. Распределение же зарядов по поверхности осуществляется таким образом, что напряженность результирующего электрического поля всех зарядов, находящихся на поверхности, в любой точке внутри проводника равна нулю.

Избыточный заряд $+q$ в силу симметрии шара распределяется по его поверхности равномерно. При равномерном распределении

электрического заряда по поверхности шара линии напряженности электрического поля в любой точке перпендикулярны поверхности шара. Следовательно, вне равномерно заряженного шара электрическое поле эквивалентно полю точечного электрического заряда, находящегося в центре шара. Отсюда напряженность электрического поля у поверхности шара равна:

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

а потенциал

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R}.$$

Задача 39. Два шара одинакового радиуса R с одноименными зарядами q_1 и q_2 находятся на расстоянии r друг от друга. Если их соединить на короткое время проводником, то заряды станут равными:

$$q'_1 = q'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2}.$$

Сравните энергию электростатического взаимодействия шаров до и после опыта. Объясните полученный результат.

Решение. Потенциальная энергия взаимодействия заряженных шаров сначала равна:

$$P_1 = q\varphi_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

затем становится равной:

$$P_2 = q'_1 \varphi'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2} \cdot \frac{q_1 + q_2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{(q_1 + q_2)^2}{16\pi\epsilon_0 r}.$$

Для сравнения величин P_1 и P_2 найдем их разность ΔP :

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \left[\left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right)^2 - q_1 q_2 \right] = \frac{(q_1 - q_2)^2}{4\pi\epsilon_0 r} > 0.$$

Следовательно, при любых значениях зарядов q_1 и q_2 энергия электростатического взаимодействия заряженных шаров после перераспределения зарядов возрастает! Этот результат кажется еще более парадоксальным, если учесть, что при перераспределении зарядов должно выделяться некоторое количество теплоты в проводнике, через который протекал электрический ток.

Объяснение полученного результата возможно лишь при учете «собственной энергии» заряженных шаров, т. е. потенциальной энергии взаимодействия зарядов на каждом из них.

Действительно, потенциальная энергия взаимодействия зарядов на шарах до перераспределения зарядов равна:

$$P'_1 = \frac{1}{2} q_1 \varphi_1 + \frac{1}{2} q_2 \varphi_2 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 R} + \frac{q_2^2}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

После перераспределения зарядов эта энергия становится равной:

$$P'_2 = \frac{1}{2} q'_1 \varphi'_1 + \frac{1}{2} q'_2 \varphi'_2 = 2 \left(\frac{q_1 + q_2}{4\pi\epsilon_0 R} \right)^2 = \frac{(q_1 + q_2)^2}{8\pi\epsilon_0 R}$$

Изменение потенциальной энергии $\Delta P'$ равно:

$$\begin{aligned} \Delta P' &= P'_2 - P'_1 = \frac{1}{8\pi\epsilon_0 R} [(q_1 + q_2)^2 - 2(q_1^2 + q_2^2)] = \\ &= -\frac{1}{8\pi\epsilon_0 R} (q_1 - q_2)^2 < 0, \end{aligned}$$

т. е. потенциальная энергия взаимодействия зарядов на шарах уменьшилась. Так как $R < r$, то увеличение энергии электростатического взаимодействия шаров всегда меньше, чем уменьшение потенциальной энергии заряженных шаров.

Задача 40. Удельное сопротивление атмосферного воздуха у поверхности Земли составляет примерно $4 \cdot 10^{13}$ Ом · м, напряженность электрического поля у поверхности Земли около 130 В · м⁻¹.

Оцените силу тока проводимости, протекающего между земной поверхностью и верхними слоями земной атмосферы.

Решение. Для оценки силы тока выделим шаровой слой атмосферы толщиной l м у поверхности Земли и определим его сопротивление R , пренебрегая кривизной:

$$\begin{array}{l} \rho = 4 \cdot 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м} \\ E = 130 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \\ r = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} \end{array} \quad \left| \quad R = \rho \frac{l}{S}; R = \frac{4 \cdot 10^{13} \cdot l}{4\pi \cdot 6,4 \cdot 10^6} \approx 7,8 \cdot 10^{-2} \text{ (Ом)} \right.$$

$I = ?$

Затем оценим силу тока:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{El}{R}; \quad I \approx \frac{130 \cdot l}{7,8 \cdot 10^{-2}} \approx 1700 \text{ (А)}.$$

Задача 41. Оцените толщину запирающего слоя в германии, исходя из предположений, что плотность объемного заряда постоянна, концентрации доноров и акцепторов по обе стороны контакта равны, все примеси ионизированы. Диэлектрическая проницаемость германия $\epsilon = 18$. Скачок потенциала принять равным $0,7$ В, концентрацию примесей 10^{19} м⁻³.

Решение. В первом приближении p — n -переход является плоским конденсатором со слоем диэлектрика толщиной d , которую мы и должны определить. Однако заряды не сосредоточены на поверхности S обкладок, а распределены по всему объему.

Из формулы емкости плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$ и выражения

$$C = \frac{q}{U},$$

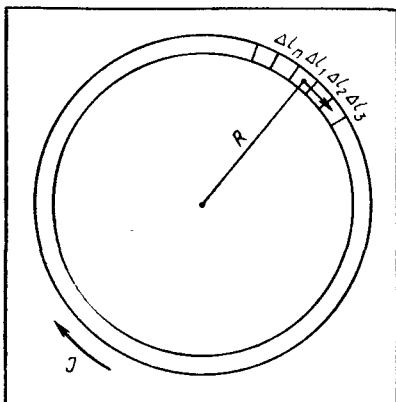


Рис. 93. К решению задачи 42

Решение. Выбирая элемент проводника Δl_1 малым, можем считать его прямолинейным и перпендикулярным к прямой, соединяющей его с центром окружности (рис. 93). При этом условии угол α в выражении (4.13) равен 90° . Получаем:

$$B_1 = k' \frac{I \cdot \Delta l_1}{R^2}.$$

Аналогичные выражения определяют величину индукции поля, создаваемого в центре окружности другими элементами проводника:

$\Delta l_2, \Delta l_3$ и т. д. до Δl_n . Индукцию магнитного поля \vec{B} , создаваемого всем круговым током, можно найти суммированием векторов индукции отдельных элементов проводника с током $\Delta l_1, \Delta l_2$ и т. д. до Δl_n . Все эти векторы параллельны, поэтому модуль B вектора индукции кругового тока определяется выражением:

$$\begin{aligned} B &= B_1 + B_2 + \dots + B_n = k' \frac{I}{R^2} (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \\ &+ \dots + \Delta l_n) = k' \frac{I}{R^2} 2\pi R = 2\pi k' \frac{I}{R}. \end{aligned}$$

Мы получили, что индукция магнитного поля в центре кругового тока прямо пропорциональна силе тока в проводнике и обратно пропорциональна радиусу окружности.

Задача 43. В МГД-генераторе используется электронно-ионная плазма с концентрацией носителей заряда $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, летящих со скоростью $1000 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Индукция магнитного поля 2 Т. Расстояние между катодом и анодом 0,5 м. Определите наибольшее напряжение и наибольший ток, которые можно получить от данного МГД-генератора, если сечение канала $0,25 \text{ м}^2$.

где $q = endS$ — заряд в объеме запирающего слоя, находим толщину запирающего слоя:

$$\begin{aligned} d^2 &= \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U}{en}; \quad d = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0 U}{en}}; \\ d &= \sqrt{\frac{18 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{19}}} \approx \\ &\approx 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}. \end{aligned}$$

Задача 42. Используя закон Био — Савара — Лапласа, вычислите индукцию магнитного поля, создаваемого током I при прохождении по проводнику, имеющему форму окружности радиусом R .

Решение. Наибольшее напряжение получается в режиме холостого хода, когда цепь нагрузки разомкнута. При этом выполняется соотношение: $e\nu B = eE$.

$$\begin{aligned} n &= 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \\ v &= 10^3 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \\ B &= 2 \text{ Т} \\ d &= 0,5 \text{ м} \\ S &= 0,25 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

$U - ? \quad I - ?$

Поскольку $E = \frac{U}{d}$, то искомое напряжение равно:

$$U = dvB; \quad U = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 2 = 1000 \text{ (В)}.$$

Наибольший ток получается в режиме короткого замыкания, когда сопротивление цепи нагрузки равно нулю. При этом сила тока будет равна $I = envS$;
 $I = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{19} \cdot 10^3 \cdot 0,25 = 2400 \text{ (А)}.$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Задача 44. Объясните, как может получаться, что электрические заряды, находящиеся на поверхности проводника, создают электрическое поле вне проводника, а внутри проводника даже у самой его поверхности напряженность электрического поля равна нулю?

Задача 45. Докажите, что при равновесном распределении электрических зарядов напряженность электрического поля равна нулю не только в любой точке внутри проводника, но также и в любой точке полости внутри проводника, если в ней нет свободных зарядов.

Задача 46. Измерения показывают, что напряженность электрического поля у поверхности Земли равна примерно $130 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1}$. Оцените электрический заряд земного шара.

Задача 47. На некотором участке поверхности проводника поверхностная плотность электрического заряда равна σ . Чему равна напряженность электрического поля вблизи этого участка поверхности проводника?

Задача 48. Если шарик, заряженный до потенциала 1 В , внести в полный шар, заряженный до потенциала 100 В , и коснуться им внутренней поверхности сферы, то заряд с шарика перейдет на сферу. Не противоречит ли этот экспериментальный факт утверждению, что заряд может переходить только от точки к большему потенциалом к точке с меньшим потенциалом?

Задача 49. Как изменится энергия плоского конденсатора, если раздвинуть его обкладки, когда:

- а) конденсатор подключен к источнику напряжения;
- б) конденсатор зарядили и отключили от источника напряжения?

Задача 50. Как изменится сила взаимодействия между пластинами конденсатора, если пространство между ними заполнить диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ϵ ? Рассмотрите случаи, когда:

- а) конденсатор подключен к источнику напряжения;
- б) конденсатор заряжен до напряжения U и отключен от источника.

Задача 51. Найдите напряженность электрического поля диполя с зарядами q_1 и q_2 на расстоянии r от него на линии, проходящей через ось диполя. Расстояние между зарядами диполя l считать много меньшим расстояния r .

Задача 52. Используя результаты вычисления силы тока в атмосфере Земли (задача 40) и зная, что разность потенциалов между поверхностью Земли и верхней границей атмосферы равна примерно $4 \cdot 10^5 \text{ В}$, оцените общее сопротивление атмосферы Земли и электрическую мощность «грозовой машины» Земли, вызывающей разделение электрических зарядов в ее атмосфере.

Задача 53. Следует ли при прокладке токопроводящих шин к электролитическим ваннам учитывать магнитное взаимодействие между шинами, если расстояние между ними 20 см , а сила тока достигает $3 \cdot 10^4 \text{ А}$?

Задача 54. Сравните силы электрического и магнитного взаимодействий двух одноименных зарядов q_1 и q_2 , летящих параллельно друг другу со скоростью v относительно данной системы отсчета. Расстояние между зарядами r .

Задача 55. Электрон, обладающий скоростью v , попадает во взаимно перпендикулярные электрическое и магнитное поля. Напряженность электрического поля E , индукция магнитного поля B . При каком условии движение электрона может остаться прямолинейным?

Задача 56. Протон, имеющий скорость 10^5 м · с⁻¹, влетает под углом 60° к направлению вектора индукции однородного магнитного поля. Определите радиус и шаг спиральной линии, по которой будет двигаться протон. Масса протона равна $1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, индукция магнитного поля 10^{-3} Т.

Задача 57. Считая, что электрон в атоме водорода движется по круговой орбите радиусом $0,53 \cdot 10^{-10}$ м, определите период обращения электрона около ядра и индукцию магнитного поля, создаваемого этим движущимся электроном в центре его орбиты.

§ 47. ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

ЗАДАНИЕ 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛА ДИЭЛЕКТРИКА

Определите диэлектрическую проницаемость материала, заполняющего пространство между обкладками плоского конденсатора.

Оборудование: керамический или слюдяной конденсатор, штангенциркуль.

Указания. Так как емкость плоского конденсатора определяется выражением:

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

диэлектрическая проницаемость материала, заполняющего пространство между его обкладками, равна:

$$\epsilon = \frac{Cd}{\epsilon_0 S},$$

где C — емкость конденсатора, d — расстояние между пластинами конденсатора, S — площадь пластин.

Если емкость C конденсатора известна, то для нахождения диэлектрической проницаемости ϵ достаточно измерить с помощью штангенциркуля толщину диэлектрика d и площадь пластины конденсатора S .

ЗАДАНИЕ 11. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ, СИЛЫ ТОКА И СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ АВОМЕТРА

Изучите устройство и принцип действия универсального электроизмерительного прибора — ампервольтметра или авометра — по инструкции, прилагаемой к прибору. Произведите с помощью

прибора измерения постоянного напряжения, силы тока и сопротивления.

Оборудование: школьный авометр, источник постоянного напряжения 4—6 В, лампа низковольтная на подставке, 3 резистора с известными сопротивлениями, 3 резистора с неизвестными сопротивлениями конденсатор бумажный, конденсатор электролитический, диод полупроводниковый, соединительные провода.

Возможный вариант выполнения задания

1. Ознакомившись с устройством и принципом действия авометра по прилагаемой к нему инструкции, подготовьте прибор к измерению постоянного напряжения около 5 В и измерьте напряжение на зажимах источника тока.

2. Подготовьте авометр к использованию в качестве омметра. Проверьте свою подготовленность к проведению измерений путем контрольных измерений сопротивлений трех резисторов, параметры которых известны. При существенных отклонениях полученных результатов от действительных значений прочтите еще раз раздел инструкции, посвященный правилам использования прибора в качестве омметра, или обратитесь за помощью к преподавателю.

3. Научившись пользоваться омметром, измерьте сопротивления трех резисторов с неизвестными параметрами и запишите полученные результаты в отчетную таблицу.

4. Проверьте с помощью омметра исправность лампы, полупроводникового диода, конденсаторов. Взяв выводы омметра в правую и левую руку, измерьте сопротивление между ними.

5. По измеренным значениям напряжения источника тока и сопротивления резистора рассчитайте силу тока в электрической цепи, составленной из источника и резистора.

6. Подготовьте авометр к использованию в качестве амперметра. Соберите электрическую цепь из источника напряжения, резистора и амперметра. Сравните результаты измерений силы тока в цепи с расчетным значением. Результаты измерений и вычислений запишите в отчетную таблицу.

ЗАДАНИЕ 12. РЕГУЛИРОВАНИЕ СИЛЫ ТОКА И НАПЯЖЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Оборудование: источник постоянного тока, амперметр, вольтметр, переменное сопротивление, потенциометр, лампа низковольтная на подставке.

Соберите сначала электрическую схему с низковольтной лампой, в которой сила тока может регулироваться с помощью переменного сопротивления (рис. 94), и измерьте пределы изменения силы тока в цепи и напряжения на лампе. Затем соберите схему, в которой

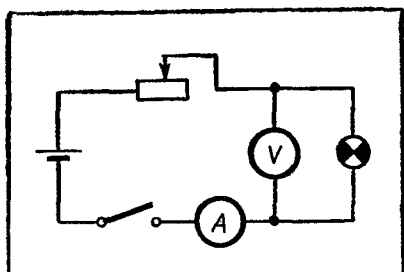


Рис. 94. Регулирование силы тока в цепи переменным сопротивлением

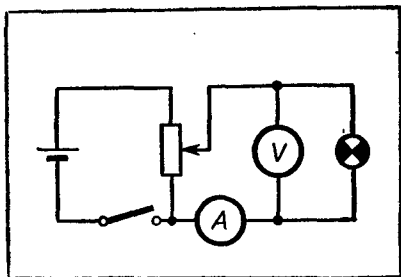


Рис. 95. Регулирование напряжения и силы тока в цепи с помощью потенциометра

напряжение на лампе регулируется с помощью потенциометра (рис. 95), и измерьте пределы изменения силы тока в цепи и напряжения на лампе.

ЗАДАНИЕ 13. ИЗМЕРЕНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО РЕЛЕ

Используя предложенное оборудование, определите сопротивление обмотки реле, напряжение и ток срабатывания и отпускания электромагнитного реле.

Оборудование: источник постоянного тока, потенциометр, электромагнитное реле, авометр, лампа низковольтная на подставке.

Указания. Простейшее электромагнитное реле имеет катушку с ферромагнитным сердечником, якорь, замыкающие контакты (КЗ) и размыкающие контакты (КР) (рис. 96).

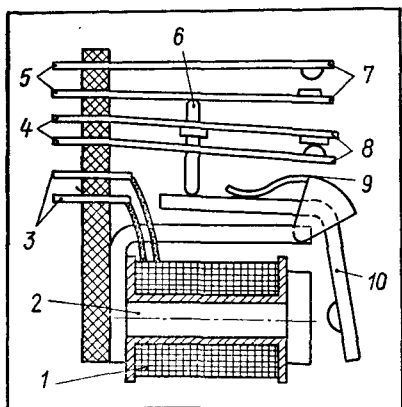


Рис. 96. Устройство электромагнитного реле

Когда через обмотку 1 реле не протекает электрический ток, якорь 10 отведен от сердечника возвратной пружиной 9, при этом замыкающие контакты 7 разомкнуты, а размыкающие контакты 8 замкнуты. При включении выводов 3 обмотки в электрическую цепь сердечник 2 намагничивается и притягивает якорь 10. Сила тока в обмотке реле, при которой электромагнитное усилие превышает силу упругости возвратной пружины и якорь реле притягивается к сердечнику, называется током срабатывания $I_{ср.аб.}$

Притяжение якоря 10 к сердечнику реле вызывает переме-

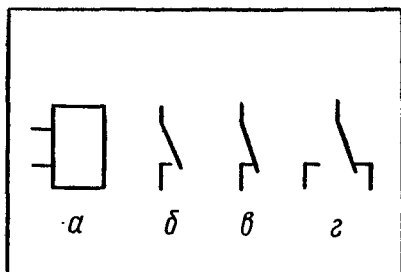


Рис. 97. Условные обозначения обмотки *a* и контактов *б*, *в*, *г* реле

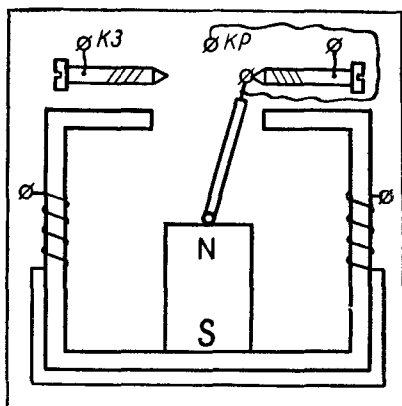


Рис. 98. Устройство поляризованного реле →

щение штифта *б*, изготовленного из изолятора. Штифт *б* размыкает контакты *КР* 8 и замыкает контакты *КЗ* 7, при этом происходит включение электрической цепи, соединенной с выводами 5 контактов *КЗ*, и выключение электрической цепи, соединенной с выводами 4 контактов *КР*.

При выключении тока в цепи обмотки реле возвратная пружина 9 отводит якорь 10 от сердечника 2, штифт *б* возвращается в исходное положение, контакты 7 *КЗ* размыкаются, контакты *КР* 8 замыкаются.

Важно отметить, что при плавном уменьшении силы тока в обмотке реле якорь удерживается сердечником при значениях силы тока в обмотке, значительно меньших тока срабатывания реле $I_{сраб}$. Сила тока, при которой действие возвратной пружины преодолевает действие электромагнитного притяжения и происходит возвращение якоря в первоначальное положение, называется током отпускания $I_{отп}$.

Условные обозначения обмотки и контактов электромагнитного реле на принципиальных электрических схемах представлены на рисунке 97.

Характеристики выше рассмотренного типа реле не зависят от направления тока в обмотке. Такие реле называются *н е й т р а л ь н ы м и*. *Электромагнитные реле, токи срабатывания и отпускания которых зависят от направления тока в обмотке, называются поляризованными реле.* Схема устройства одного из типов поляризованного реле представлена на рисунке 98.

Возможный вариант выполнения задания

1. Ознакомьтесь с устройством электромагнитного реле, определите расположение выводов обмотки и размыкающих контактов *КР*. При отсутствии схемы устройства реле для определения выводов обмотки и контактов *КР* можно воспользоваться омметром. Обмот-

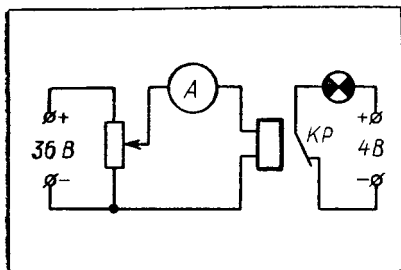


Рис. 99. Схема для определения параметров электромагнитного реле

ка реле обычно имеет электрическое сопротивление от сотен ом до нескольких килоом; между выводами размыкающих контактов КР в нормальном состоянии реле сопротивление равно нулю. Измерьте сопротивление обмотки реле.

2. Соберите электрическую схему по рисунку 99. Плавно изменяя с помощью потенциометра напряжение, подаваемое на выводы обмотки реле, определите напряжение и силу тока

срабатывания реле. Срабатывание реле определяется по погасанию лампы в исполнительной цепи.

3. Плавно уменьшая напряжение, подаваемое на выводы обмотки реле, определите напряжение и силу тока отпущения реле.

ЗАДАНИЕ 14. ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОРЕЗИСТОРА И ФОТОДИОДА ОТ ОСВЕЩЕНИЯ

Измерьте сопротивления фоторезистора и фотодиода при освещении и в темноте.

Оборудование: авометр, фоторезистор, фотодиод.

Указания. Для защиты от рассеянного дневного света фоторезистор и фотодиод помещаются в светонепроницаемую трубу или коробку с отверстием в крышке. Источником света может служить лампа накаливания или дневной свет. В качестве фотодиода может быть использован плоскостной транзистор, у которого имеется какой-либо дефект, но исправен один $p-n$ -переход. Для того чтобы открыть доступ свету к $p-n$ -переходам транзистора, необходимо спилить напильником часть металлического корпуса транзистора, например, типа П13-П16, МП-39-М42, П101-П103. При включении выводов база — коллектор такой транзистор может быть использован в качестве фотодиода, при включении выводов эмиттер — коллектор — в качестве более чувствительного к свету элемента, называемого фототранзистором.

ЗАДАНИЕ 15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА

Пользуясь справочником, определите тип транзистора, расположение его выводов. С помощью омметра проверьте исправность транзистора.

Оборудование: транзисторы, авометр, справочник.

Указания. Проверка исправности транзистора с помощью омметра заключается в измерении сопротивлений эмиттерного и коллекторного переходов в прямом и обратном направлениях. У исправного маломощного транзистора сопротивление $p-n$ -перехода в прямом направлении обычно составляет несколько сотен ом, в обратном направлении — порядка 10^6 Ом. С помощью омметра допустимы испытания лишь низкочастотных транзисторов, так как для некоторых типов высокочастотных транзисторов напряжение батареи омметра превышает напряжение пробоя $p-n$ -перехода.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СКОРОСТИ ТЕПЛООВОГО ДВИЖЕНИЯ МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

З а д а н и е. Выполните эксперимент, по результатам которого можно оценить среднюю скорость теплового движения молекул воздуха.

Оборудование: модель ракеты, шар стеклянный для взвешивания воздуха, весы технические с разновесом, насос, цилиндр измерительный, сосуд с водой, рулетка.

Вариант I

У к а з а н и я. Пусть сосуд, заполненный газом, находится в вакууме, и воздействия на него внешних тел взаимно скомпенсированы. Если в одной из его стенок имеется отверстие, то после некоторого числа соударений между собой и со стенками сосуда из него вылетят все молекулы газа. Каждая молекула вылетает из сосуда со скоростью теплового движения v . Для упрощения предположим, что все молекулы в момент вылета движутся в одном направлении.

Реактивная сила, возникающая при истечении газа, приведет сосуд в движение в направлении, противоположном направлению вылета молекул газа из сосуда. На основании закона сохранения импульса для системы отсчета, связанной с центром масс системы «сосуд — газ», можно записать:

$$M\vec{V} + m\vec{v} = 0,$$

где M — масса сосуда, \vec{V} — скорость сосуда после вылета всех молекул газа, m — масса газа, \vec{v} — средняя скорость теплового движения молекул газа. Если массу M сосуда и массу m газа, заключенного в сосуде, измерить до выполнения опыта, а затем в опыте измерить скорость V сосуда, приобретаемую в результате

истечения газа, то средняя скорость v теплового движения молекул определится из выражения:

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

От мысленного эксперимента перейдем к реальным условиям. Для выполнения эксперимента по определению средней скорости теплового движения молекул воздуха можно воспользоваться пластмассовой моделью ракеты. В комплект

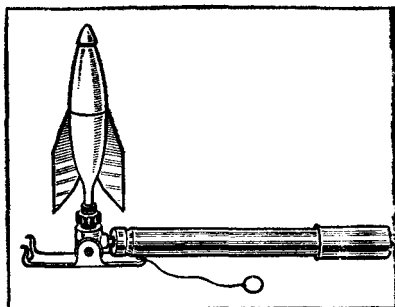


Рис. 100. Модель ракеты с пусковым устройством

приборов для запуска ракеты входят насос, пусковое приспособление, на котором имеется штуцер с резьбой для соединения с насосом, направляющая трубка с уплотнительным кольцом (рис. 100). Внутри направляющей трубки имеется клапан, благодаря которому воздух не выходит из ракеты, пока она соединена с пусковым устройством.

В соплу ракеты вставляется направляющая трубка пускового устройства, и ракета прижимается к нему спусковой скобой. Накачав в ракету воздух с помощью насоса, можно произвести запуск ракеты. Для этого устанавливают насос с ракетой на столе и рывком за нитку срывают с бортика сопла ракеты спусковую скобу, удерживающую ракету на спусковом устройстве.

Воздух в ракете и в атмосфере находится при одинаковой температуре, скорости движения молекул одинаковы. Однако концентрация молекул газа в ракете больше, чем в атмосфере, поэтому при открывании сопла из ракеты в единицу времени вылетает большее количество молекул, чем влетает из атмосферы в ракету. Реактивная сила отдачи вылетающих молекул приводит ракету в движение. Выход воздуха из ракеты продолжается до тех пор, пока концентрация молекул в ракете не станет равной концентрации молекул в атмосферном воздухе. Этот процесс выравнивания концентраций можно приблизительно рассмотреть как процесс вылета из ракеты всех молекул воздуха, накачанных насосом. Скорость вылета молекул можно принять равной средней скорости их теплового движения.

Возможный вариант выполнения работы

1. Взвешиванием на весах определите массу ракеты M .
2. Укрепите ракету на пусковом устройстве и определите ее массу m_1 вместе с этим устройством.
3. Присоедините насос к пусковому устройству и накачайте воздух в ракету.

4. После отсоединения от насоса вновь взвесьте ракету с пусковым устройством, определив массу m_2 .

5. Вычислите массу m воздуха, который выйдет из ракеты при открывании сопла ракеты:

$$m = m_2 - m_1.$$

6. Произведите запуск ракеты вертикально вверх и измерьте максимальную высоту подъема ракеты h . Вычислите скорость ракеты после вылета струи воздуха:

$$V = \sqrt{2gh}.$$

7. Вычислите среднюю скорость теплового движения молекул воздуха:

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

Вариант II

У к а з а н и я. Средняя квадратичная скорость молекулы газа определяется выражением:

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}},$$

где R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура, M — молярная масса газа. Покажем, что среднюю квадратичную скорость молекул газа можно определить, не зная его молярной массы M и не измеряя температуры T . Для этого, используя уравнение Менделеева — Клапейрона, найдем выражение универсальной газовой постоянной R через параметры газа:

$$\rho V = \frac{m}{M} RT; \quad R = \frac{\rho VM}{mT}.$$

Подставив полученное выражение в формулу средней квадратичной скорости, получим:

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3\rho VM T}{mTM}} = \sqrt{\frac{3\rho V}{m}},$$

где m — масса газа, V и ρ — его объем и давление. Мы получили, что для определения средней квадратичной скорости молекул газа достаточно знать массу газа m , занимаемый им объем V и его давление ρ . Все эти три параметра могут быть измерены с помощью простых приборов.

Если, предварительно взвесив шар с воздухом, откачать из него большую часть воздуха и взвесить его вторично, то можно определить массу откачанного воздуха. Долю объема V , который занимал откачанный воздух, можно определить, предоставив возможность воде занять этот объем. Измерить объем воды, равный объему откачанного из шара воздуха V , нетрудно.

Подставив найденные значения давления ρ , объема V и массы m в формулу, можно вычислить среднюю квадратичную скорость движения молекул воздуха $\bar{v}_{\text{кв}}$.

Возможный вариант выполнения работы

1. Определите давление воздуха p по показаниям барометра в физическом кабинете. Выразите его в единицах СИ.

2. Определите с помощью технических весов массу m_1 шара, заполненного воздухом при атмосферном давлении.

3. Откачайте из шара воздух. Перекройте с помощью зажима доступ воздуху в шар. Определите массу шара m_2 после откачивания воздуха.

4. Вычислите массу откачанного из колбы воздуха $m = m_1 - m_2$. Выразите ее в килограммах.

5. Погрузите конец резиновой трубки в воду и откройте зажим. Вода заполнит объем, ранее занимаемый откачанным воздухом. Измерьте объем воды, вошедшей в шар, с помощью измерительного цилиндра. Выразите объем в кубических метрах.

6. Подставьте найденные значения величин p , m и V в формулу и определите среднюю квадратичную скорость движения молекул воздуха $\bar{v}_{\text{кв}}$.

Отчетная таблица

Давление воздуха в открытой колбе p Па	Масса шара с воздухом m_1 кг	Масса шара после откачивания m_2 кг	Масса откачанного из колбы воздуха $m = m_1 - m_2$ кг	Объем воздуха V м^3	Средняя квадратичная скорость движения молекул $\bar{v}_{\text{кв}}$ м/с

Указание по технике безопасности: стеклянный шар во время выполнения работы должен находиться в защитном чехле.

Контрольные вопросы

1. Какие погрешности мы допускаем, переходя от идеализированной схемы опыта к реальному эксперименту?

2. Одинаковы или различны средние квадратичные скорости движения молекул различных газов, находящихся в сосуде?

3. Каковы источники ошибок при измерении средней квадратичной скорости молекул воздуха описанным методом?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯРНОЙ МАССЫ ГАЗА

З а д а н и е. Определите экспериментальным путем молярную массу воздуха, рассматривая его как однородный газ.

Об о р у д о в а н и е: любые приборы и принадлежности из школьного кабинета физики.

Указанн я. Молярную массу M вещества, находящегося в газообразном состоянии, можно определить путем измерения его объема V , давления p , массы m и температуры T . Действительно, из уравнения состояния идеального газа

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

следует:

$$M = \frac{mRT}{pV}.$$

Для измерения давления p воздуха имеется манометр, объем воздуха определяется объемом V стеклянного шара, массу m воздуха в шаре можно определить с помощью весов, температура T воздуха определяется термометром.

Стеклянный шар во время выполнения работы должен находиться в защитном чехле.

Возможный вариант выполнения работы

1. Соединив шар с манометром и насосом, работающим на разрежение, как показано на рисунке 101, откачайте из него воздух до минимального значения давления p_1 , которое можно получить с помощью вакуумного насоса. Перекрыв зажимом резиновую трубку, отсоедините шар от манометра и определите его массу m_1 с помощью весов.

2. Присоедините шар к манометру и насосу, работающему на нагнетание. Накачав в шар воздух до давления $p_2 \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$, перекройте зажимом резиновую трубку, отсоедините шар от манометра и определите его массу m_2 с помощью весов.

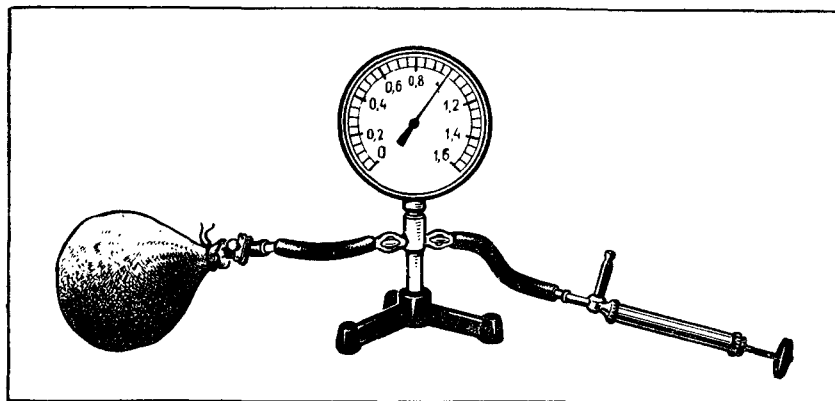


Рис. 101. Откачка воздуха из стеклянного шара

3. Поскольку воздух с массой, равной

$$m = m_2 - m_1,$$

создаст в шаре объемом V давление

$$p = p_2 - p_1$$

при температуре T , равной температуре воздуха в комнате, его молярная масса M определится выражением:

$$M = \frac{mRT}{pV} = \frac{(m_2 - m_1)RT}{(p_2 - p_1)V}.$$

Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

$V,$ м ³	$p_1,$ Па	$p_2,$ Па	$p = p_2 - p_1$ Па	$m_1,$ кг	$m_2,$ кг	$m = m_2 - m_1,$ кг	$T,$ К	$M,$ кг · моль ⁻¹

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РОСТА КРИСТАЛЛОВ

З а д а н и е. Определите скорость роста кристаллов поваренной соли.

Об о р у д о в а н и е: микроскоп школьный, секундомер, насыщенный раствор поваренной соли, покровное стекло, стеклянная палочка, миллиметровая бумага.

У к а з а н и я. Если нанести небольшую каплю насыщенного раствора поваренной соли на покровное стекло, то через некоторое время начнется интенсивное образование кристаллов и их рост. Характеристикой процесса роста кристалла может быть, например, отношение прироста грани кристалла ко времени, за которое прирост происходит.

Если рядом с покровным стеклом на столике микроскопа расположить листок миллиметровой бумаги, то, глядя одним глазом в окуляр микроскопа, а другим — на миллиметровую бумагу, можно увидеть изображения растущих кристаллов на фоне миллиметровой бумаги. Расположив миллиметровую бумагу так, чтобы линии на ней были параллельны одной из граней кристалла, и наблюдая рост кристалла, можно определить по секундомеру время, за которое грань кристалла вырастет на 1, 2, 3 мм.

Определяя абсолютную величину прироста грани кристалла за 1 с, нужно учитывать, что при 80-кратном увеличении

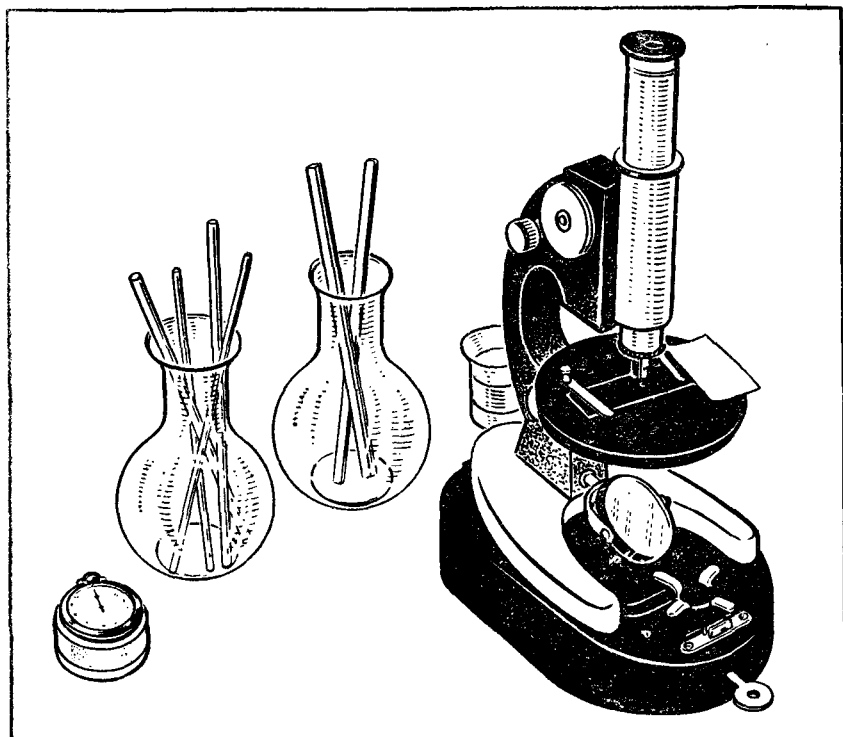


Рис. 102. Определение скорости роста кристалла

микроскопа 1 мм прироста грани кристалла равен в действительности 1/80 мм.

Возможный вариант выполнения работы

1. Установите в микроскопе окуляр $10\times$, объектив $8\times$ и приготовьте его к наблюдению за ростом кристаллов. Для этого получите резкое изображение поверхности покровного стекла (рис. 102).

2. Нанесите небольшую каплю насыщенного раствора поваренной соли на стекло и наблюдайте за образованием и ростом кристаллов.

3. Нанесите раствор на стекло еще раз, саранее положив листок миллиметровой бумаги возле покровного стекла так, чтобы, глядя одним глазом в окуляр микроскопа, а другим — на миллиметровую бумагу, можно было увидеть изображения растущих кристаллов на фоне миллиметровой бумаги.

4. С началом роста кристаллов выберите для наблюдений одиночный кристалл. Расположите миллиметровую бумагу так, чтобы

линии на ней были параллельны одной из граней наблюдаемого кристалла. Дождитесь, когда сторона куба кристалла соли станет равной 1—2 мм, и в этот момент запустите секундомер.

5. Когда сторона этого куба вырастет на 1 мм, отметьте время по секундомеру. Таким же способом определите время, за которое грань кристалла вырастет на 2, 3, 4 мм.

6. Зная, что увеличение микроскопа равняется 80 ($8 \times 10 = 80$), т. е. 1 мм при наблюдении по миллиметровой бумаге равен в действительности $1/80$ мм, определите абсолютную величину прироста грани кристалла за 1 с.

7. Рассчитайте, какое количество атомных слоев укладывается в процессе роста кристалла каменной соли за 1 с, если диаметр ионов натрия и хлора равен примерно $3 \cdot 10^{-10}$ м.

Контрольные вопросы

1. Почему скорость роста грани кристалла убывает со временем?

2. Почему в обычных условиях в пересыщенном растворе вырастает один большой кристалл, а много мелких?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ СТАЛИ ДО И ПОСЛЕ ЗАКАЛКИ

З а д а н и е. Определите по методу Бринеля твердость стального образца до закалки и после нее. Для закалки стальной пластины нагрейте ее до температуры примерно 900°C и затем быстро охладите. Образец можно нагреть в электрической печи или между двумя лабораторными электроплитками.

Оборудование: стальная пластинка, гидравлический пресс, стальной шарик в оправке, электрическая печь или две лабораторные электроплитки штангенциркуль, лупа, пинцет, металлический сосуд с водой, шприцы с зажимом.

Содержание и метод выполнения работы

Сопротивление материала вдавливанию или царапанию характеризует его твердость. В методе определения твердости по Бринелю стальной шарик диаметром D вдавливается в образец и оставляет на его поверхности лунку тем большего диаметра d , чем менее твердым является материал и чем больше сила давления F . Мерой твердости служит отношение:

$$H_B = \frac{F}{S}, \quad (1)$$

где S — площадь поверхности сферического отпечатка, F — сила, действующая на шарик.

Площадь лунки находят как площадь поверхности шарового сегмента:

$$S = \pi Dh, \quad (2)$$

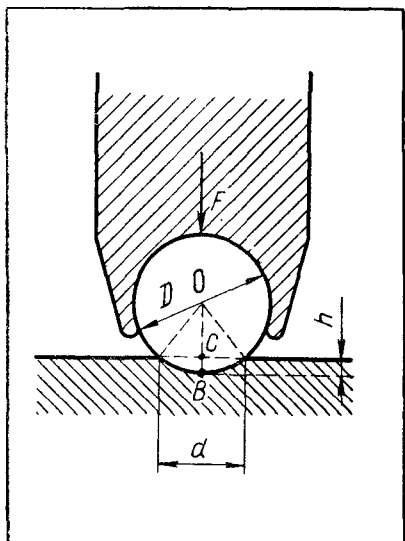


Рис. 103. Стальной шарик в оправке и лунка на поверхности стального образца

поршня пресса $S_{\text{п}}$, определяемую по измерению его диаметра $D_{\text{п}}$ штангенциркулем:

$$F = pS_{\text{п}}; \quad S_{\text{п}} = \frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4}.$$

Порядок выполнения работы

1. Измерьте штангенциркулем диаметр большого поршня гидравлического пресса $D_{\text{п}}$ (рис. 104).

2. Положите образец на плиту поршня, вставьте оправку с шариком, закройте сливной вентиль пресса. Действуя рукояткой пресса, получите давление $p = 5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ и выдержите образец под нагрузкой в течение 10 с.

3. Откройте сливной вентиль, выньте образец и измерьте диаметр отпечатка шарика штангенциркулем, используя для большей точности отсчета лупу.

4. Описанные операции повторите 3 раза и определите среднее значение твердости образца до закалки. Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

5. Поместите пластину в электрическую печь и разогрейте ее до ярко-красного свечения. Открывать печь и вынимать образец можно только в присутствии учителя!

6. Щипцами захватите образец и бросьте его в металлический сосуд с водой.

где h — глубина лунки, D — диаметр шарика.

Поскольку диаметр лунки d может быть измерен более точно, чем ее глубина h , то формулу (2) необходимо преобразовать, выразив h через D и d .

Как видно из рисунка 103, $BC = BO - CO$,

или

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2},$$

тогда

$$S = \frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2}). \quad (3)$$

Силу давления на шарик находят как произведение давления в цилиндре пресса p , измеренного по показаниям манометра, на площадь большого

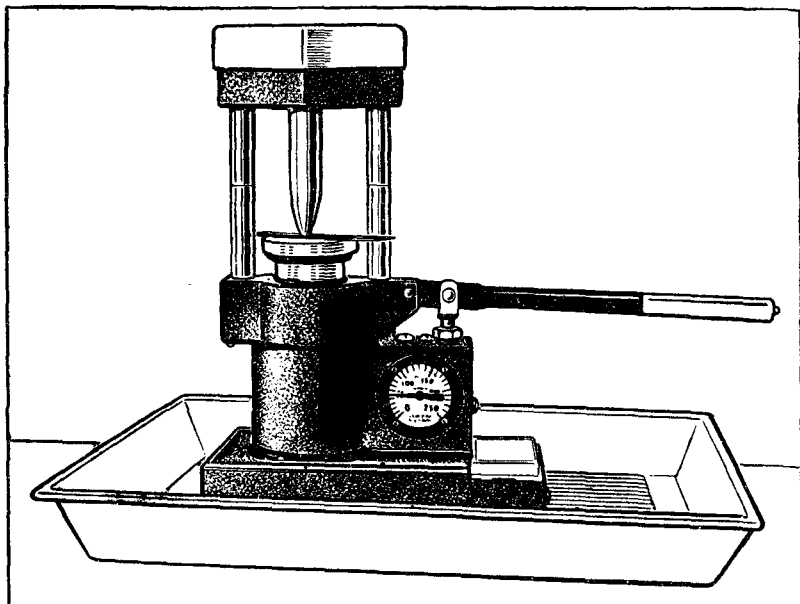


Рис. 104. Школьный гидравлический пресс

7. После охлаждения зачистите поверхность образца наждачной бумагой и определите его твердость заново. Результаты измерений занесите в отчетную таблицу. Сравните твердость образца до и после закалки.

Меры предосторожности. 1. При работе с прессом оправа с шариком должна быть расположена строго вертикально.

2. Давление масла в прессе нужно повышать плавно и не доводить его до величины более $1,5 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$.

Отчетная таблица

№ измерения	$D_{\text{ш}}, \text{ м}$	$d, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$p, \text{ Па}$	$F, \text{ Н}$	$H_B, \text{ Па}$
До закалки						
1.						
2.						
3.						
После закалки						
1.						
2.						
3.						

Контрольные вопросы

1. Почему при быстром охлаждении стали ее твердость повышается?
2. Почему при медленном охлаждении стали (отжиге) получаются значения твердости, не превышающие твердость исходного образца?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ХОЛОДИЛЬНИКА

З а д а н и е. Определите хладопроизводительность и холодильный коэффициент холодильника.

Оборудование: холодильник, ватметр, сосуд металлический с водой, термометр, часы.

Содержание и метод выполнения работы

Холодильная машина осуществляет перенос тепла Q_2 , отнятого у среды, окружающей испаритель, к среде, окружающей конденсатор. В конденсаторе выделяется количество теплоты Q_1 , равное $Q_1 = Q_2 + A$, где A — работа, совершенная электродвигателем компрессора.

Экономичность холодильника определяется холодильным коэффициентом ϵ , равным отношению количества теплоты Q_2 , отнятого от охлаждаемого тела испарителем, к работе A , совершенной при этом двигателем компрессора:

$$\epsilon = \frac{Q_2}{A}. \quad (1)$$

Холодильный коэффициент показывает, какое количество тепла отнимается от охлаждаемого тела при затрате единицы работы.

Другой практически важной характеристикой холодильной машины является ее хладопроизводительность — количество теплоты q , отнимаемое от охлаждаемых тел за единицу времени:

$$q = \frac{Q_2}{t}. \quad (2)$$

В технике хладопроизводительность измеряется в Дж/ч. Для измерения количества теплоты Q_2 , отнимаемого у охлаждаемого тела, можно поместить в испаритель металлический сосуд с водой. Масса сосуда m и масса воды M известны.

Включив в сеть электродвигатель компрессора на некоторое время t и измерив мощность электродвигателя N с помощью ваттметра, можно определить затраченную работу A :

$$A = Nt.$$

Измерив понижение температуры воды ΔT , можно определить количество теплоты, отнятое у воды и металлического сосуда:

$$Q_2 = c_1 m \cdot \Delta T + c_2 M \cdot \Delta T.$$

Значения удельных теплоемкостей металла c_1 и воды c_2 находят из справочных таблиц. По найденным значениям величин A , Q_2 и времени работы холодильника t можно вычислить холодильный коэффициент ε и хладопроизводительность q холодильника.

Порядок выполнения работы

1. Определите массу m сосуда взвешиванием и налейте в него известный объем воды. Измерьте начальную температуру воды в сосуде.

2. Поставьте сосуд с водой в испаритель, включите электродвигатель компрессора и одновременно сделайте отсчет времени.

3. С помощью ваттметра определите мощность N , потребляемую электродвигателем компрессора.

4. Через 30 мин выключите электродвигатель компрессора и определите температуру воды в сосуде.

5. Предполагая, что количество тепла, отнимаемое у воздуха в шкафу холодильника, мало по сравнению с количеством тепла, отнимаемым от сосуда с водой, определите холодильный коэффициент и хладопроизводительность холодильника.

Результаты измерений и вычислений занесите в отчетную таблицу.

Отчетная таблица

m , кг	M , кг	ΔT , К	Q_2 , Дж	t , с	N , Вт	A , Дж	$q = \frac{Q_2}{t}$, Дж/ч	$\varepsilon = \frac{Q_2}{A}$

Контрольные вопросы

1. Как повлияет на работу холодильника замена воздушного охлаждения конденсатора охлаждением проточной водой?

2. Можно ли повысить температуру в помещении, открыв дверцу работающего холодильника?

3. Для какой цели капиллярная трубка находится в хорошем тепловом контакте с трубкой, соединяющей испаритель с компрессором?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ПОВЕРКА ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

З а д а н и е. Ознакомьтесь с устройством и принципом действия приборов для измерения силы тока и напряжения и выполните поверку точности приборов. Поверкой измерительного прибора называется определение его погрешности.

Оборудование: приборы для измерения силы тока и напряжения различных систем и классов точности, источник постоянного тока, набор резисторов, соединительные провода, ключ.

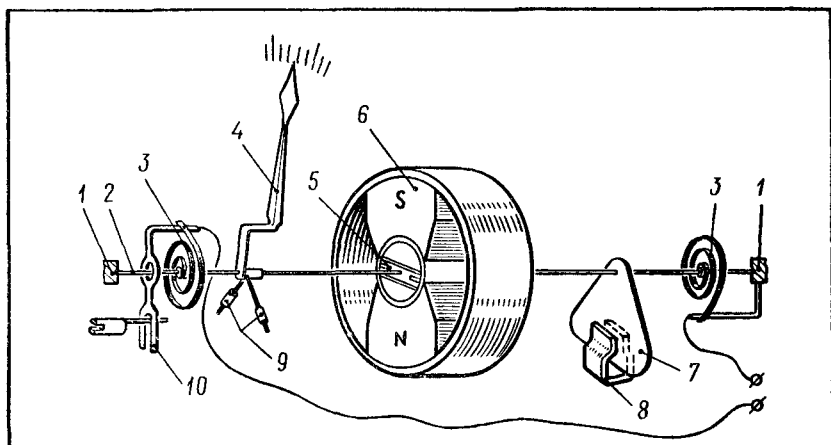


Рис. 105. Устройство электроизмерительного прибора магнитоэлектрической системы

Содержание и метод выполнения работы

Приборы для измерения силы тока и напряжения обычно являются приборами непосредственного отсчета, в которых численное значение измеряемой величины определяется по шкале прибора. Поворот стрелки прибора осуществляется подвижной частью измерительного механизма. Взаимодействие подвижной и неподвижной частей измерительного механизма может быть основано на использовании различных явлений. В соответствии с этим по принципу действия электроизмерительные приборы делятся на приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, электростатической и ряда других систем.

В приборе магнитоэлектрической системы (рис. 105) измеряемый ток пропускают через рамку 5, помещенную в магнитное поле постоянного магнита 6. Рамка укреплена на опорах или на растяжках (рис. 106). Для уменьшения погрешностей измерений силы трения должны быть как можно меньше. Поэтому стальные керны 2, которыми оканчивается ось вращения рамки, опираются на подпятники 1, изготовленные из синтетического агата, рубина или корунда. Совершенно исключаются силы трения при использовании подвеса рамки на растяжках.

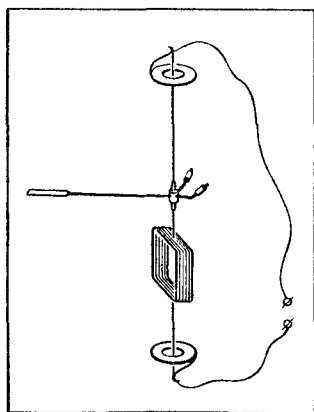


Рис. 106. Крепление рамки электроизмерительного прибора на растяжках

При пропускании измеряемого тока через рамку на участки проводников рамки, расположенные перпендикулярно линиям индукции магнитного поля, действует сила Ампера. Если бы подвижная часть измерительного механизма не имела пружины 3, противодействующей ее повороту, то при пропускании тока через рамку происходил бы поворот ее до 180° независимо от силы тока. Но силы упругости, возникающие при закручивании пружины или растяжки, препятствуют повороту рамки. Сила упругости прямо пропорциональна углу закручивания пружины. Угол поворота, при котором наступает равенство момента силы Ампера, вызывающей поворот рамки, и момента силы упругости, возвращающей рамку в исходное положение, оказывается пропорциональным силе тока в рамке, так как сила Ампера пропорциональна силе тока в рамке. Пружины или растяжки обычно используются и для подведения измеряемого тока к рамке или катушке прибора.

При включении прибора в электрическую цепь момент сил, вызывающих поворот подвижной части измерительной системы, значительно превосходит момент сил упругости пружины. Поэтому подвижная часть вращается с ускорением и к моменту достижения угла поворота, при котором наступает равенство моментов сил, приобретает запас кинетической энергии вращательного движения. За счет этой энергии подвижная система должна пройти положение равновесия, испытывая постепенное замедление под действием возвращающей пружины, затем совершить поворот в обратную сторону и так совершать колебания относительно положения равновесия. Для устранения этих колебаний в приборах применяются успокоители. Наиболее распространенными являются магнитно-индукционные успокоители.

В них для торможения подвижной системы применяется тонкая алюминиевая пластина 7, помещенная между полюсами постоянного магнита 8 и закрепленная на оси вращения подвижной системы. При повороте подвижной системы алюминиевая пластина успокоителя движется в поле постоянного магнита. Наводимые в ней при этом индукционные токи согласно закону Ленца имеют такое направление, что своим взаимодействием с магнитным полем препятствуют тому движению, которое послужило причиной их возникновения, т. е. тормозят движение пластины и вместе с тем вращение всей подвижной системы электроизмерительного прибора.

Для того чтобы при любом положении указательной стрелки 4 подвижная часть была уравновешенной в поле силы тяжести, имеются противовесы 9. Установка стрелки на нулевое деление шкалы производится с помощью корректора 10.

Подвижные части приборов других систем имеют аналогичное устройство, только вращение их вызывается другими способами. В приборах электромагнитной системы измеряемый ток пропускается

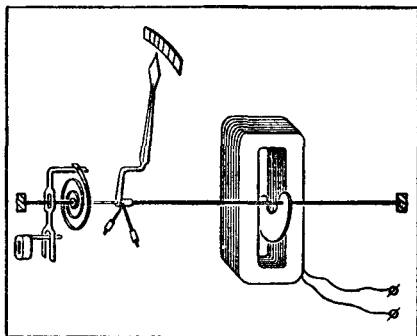


Рис. 107. Устройство прибора электромагнитной системы

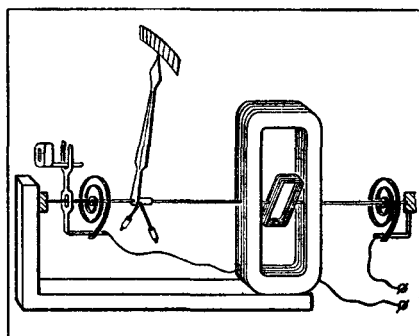


Рис. 108. Устройство прибора электродинамической системы




через неподвижную катушку, а вращение системы вызывается втягиванием в эту катушку стального сердечника, связанного с подвижной системой (рис. 107). В приборах электродинамической системы измеряемый ток пропускается через две катушки, из которых одна неподвижна, а другая входит в подвижную систему. Поворот подвижной системы вызывается взаимодействием токов в этих двух катушках (рис. 108).

В приборах электростатической системы вращение измерительной системы вызывается силами электростатического взаимодействия разноименно заряженных проводников. Поворот стрелки в приборах этой системы пропорционален разности потенциалов между системами подвижной и неподвижной пластин.

Поворот стрелки в приборах магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем пропорционален силе тока, протекающего через измерительную систему прибора, однако шкала прибора может быть отградуирована и в единицах измерения напряжения, так как сила тока, протекающего через измерительную систему прибора, прямо пропорциональна напряжению, приложенному к выводам измерительной системы. Для расширения пределов измерения силы тока внутри прибора может быть помещен шунт с малым сопротивлением, включенный параллельно измерительной системе. Расширение пределов измерения напряжения достигается включением последовательно с измерительной системой дополнительного сопротивления.

Условные обозначения, позволяющие определить систему электроизмерительного прибора, назначение прибора по роду измеряемой величины, рабочее положение прибора при измерениях и его класс точности, приведены в таблице.

Условные обозначения электроизмерительных приборов

Измеряемая величина	Обозначение	Система прибора	Обозначение
Сила тока	A	Магнитоэлектрическая	
Напряжение	V	Электромагнитная	
Электрическое сопротивление	Ω	Электродинамическая	
Электрическая мощность	W	Электростатическая	
Измеряемый ток		Положение прибора при измерении	
Постоянный	—	Вертикальное	
Переменный	~	Горизонтальное	
Постоянный и переменный	\approx	Под углом 60°	

Особого обсуждения заслуживает вопрос о погрешностях измерений электроизмерительных приборов. Первый возможный источник ошибок — это ошибки, допускаемые при снятии показаний прибора. Помимо этого, каждый прибор вносит погрешности, обусловленные невозможностью абсолютно точно проградуировать прибор при изготовлении и получить абсолютно одинаковые показания при повторных измерениях в одинаковых условиях.

Как известно, оценку точности измерений можно производить по абсолютной или относительной погрешности. **А б с о л ю т н а я** погрешность ΔA показаний электроизмерительного прибора обычно имеет примерно одинаковое значение как в начале шкалы прибора, так и у ее конца, следовательно, **о т н о с и т е л ь н а я** погрешность измерения $\varepsilon = \frac{\Delta A}{A}$ уменьшается по мере приближения значения измеряемой величины A к наибольшему значению, которое доступно измерению с помощью данного прибора. Поэтому при наличии нескольких измерительных приборов одинаковой точности с различными диапазонами измерений или при возможности изменения пределов измерения с помощью переключения встроенных в прибор шунтов или дополнительных сопротивлений следует использовать прибор, у которого отклонение стрелки будет во второй половине шкалы.

Точность электроизмерительных приборов характеризуется отношением абсолютной погрешности ΔA к максимальному значению

величины $A_{и}$, измеряемому с помощью данного прибора, выраженным в процентах:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{\Delta A}{A_{и}} 100 \%$$

Эта величина называется приведенной погрешностью прибора. Очевидно, что относительная погрешность прибора равна приведенной погрешности при отклонении стрелки на всю шкалу. При измерении меньших значений измеряемой величины относительная погрешность превышает приведенную погрешность прибора.

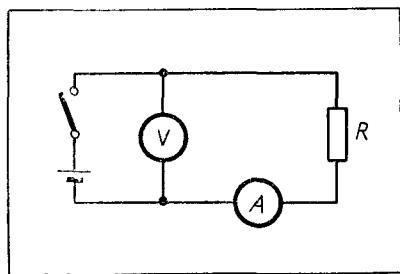
По приведенной погрешности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Кроме погрешности отсчета и собственной погрешности прибора, ошибка измерений может возникать в результате изменений, вносимых включением в электрическую цепь измерительных приборов. Этими изменениями можно пренебречь в том случае, если сопротивление измерительной цепи для измерения силы тока значительно меньше электрического сопротивления цепи, в которую включается измерительный прибор.

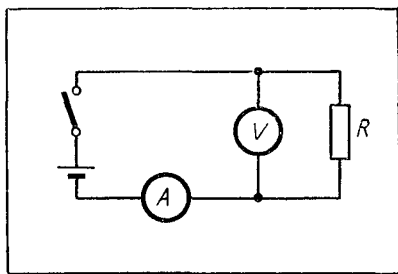
Напряжение на участке цепи, параллельно которому включается прибор для измерения напряжения, практически не изменяется, если сопротивление измерительной цепи прибора значительно больше сопротивления участка цепи.

Кроме изменений в электрической цепи, вносимых включением одного измерительного прибора, в ряде случаев необходимо учитывать погрешности, возникающие при одновременном включении в цепь приборов для измерения силы тока и напряжения.

Пусть, например, требуется измерить напряжение на резисторе в цепи постоянного тока и силу тока в цепи. Возможны два способа включения измерительных приборов в цепь, представленные на рисунке 109. При первом способе включения приборов амперметр измеряет силу тока, протекающего через резистор R , но вольтметр измеряет сумму падений напряжения на резисторе U_R и амперметре U_A : $U = U_R + U_A$.



1



2

Рис. 109. Два способа включения электроизмерительных приборов

Во втором случае вольтметр измеряет напряжение на резисторе U_R , но через амперметр протекает ток, являющийся суммой силы тока I_R через резистор R и силы тока I_V через вольтметр:

$$I = I_R + I_V.$$

Порядок выполнения работы

1. По обозначениям на шкалах электроизмерительных приборов, предложенных вам для изучения, определите назначение приборов и основные их характеристики.

2. Определите, какой из приборов для измерения силы тока имеет наиболее высокий класс точности, и подберите другие приборы для измерения силы тока, показания которых можно проверить с помощью первого прибора. Выберите резистор, включение которого последовательно с имеющимся источником постоянного тока обеспечит значение силы тока в цепи, необходимое для проверки приборов для измерения силы тока.

3. Соберите электрическую цепь по схеме, представленной на рисунке 110, и снимите показания приборов для измерения силы тока. Приняв показания прибора более высокого класса точности за верные, определите относительную погрешность измерений поверяемого прибора.

4. Аналогичным способом выполните проверку вольтметра по прибору более высокого класса точности.

Контрольные вопросы

1. Приборы каких систем пригодны для измерений силы тока и напряжения только в цепях постоянного тока?
2. Каким образом можно учесть погрешности измерений, возникающие при включении приборов по схеме, представленной на рис. 109?

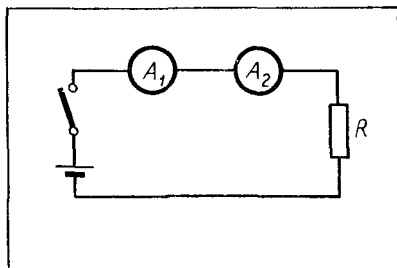


Рис. 110. Схема проверки приборов для измерения силы тока

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Оборудование: электронный осциллограф, батарея БАС-70, выпрямитель ВС-24, диод, резистор, соединительные провода, авометр, микрофон.

Содержание и метод выполнения работы
Основными элементами электронного осциллографа являются электронно-лучевая трубка, блок питания и блок временной развертки. От блока питания подается напряжение на катод, анод и электроды электронно-лучевой труб-

ки, фокусирующие пучок электронов и изменяющие его интенсивность. Блок питания обеспечивает также необходимыми напряжениями электронные схемы блока временной развертки и усилителей горизонтального и вертикального отклонения луча.

Через 2—3 мин после включения осциллографа в сеть на экране его электронно-лучевой трубки появляется светящееся пятно. Свечение кристаллов, нанесенных на внутреннюю поверхность трубки, вызывается ударами электронов, испускаемых катодом трубки и разгоняемых электрическим полем между катодом и анодом (рис. 111). Интенсивность свечения пятна на экране электронно-лучевой трубки может изменяться вращением ручки «яркость». Эта ручка связана с потенциометром, с которого подается запирающее напряжение на управляющий электрод, расположенный между катодом и анодом трубки. Понижение потенциала управляющего электрода относительно потенциала катода препятствует прохождению электронов от катода к аноду и вызывает ослабление интенсивности электронного пучка.

В электронно-лучевой трубке осциллографа электроны, испущенные катодом, разгоняются электрическим полем, существующим между анодом и катодом, до одинаковой скорости u :

$$\frac{mv^2}{2} = eU_a.$$

Пролетев сквозь отверстие в аноде, электроны движутся до экрана трубки по инерции с постоянной скоростью и попадают в одну и ту же точку, вызывая свечение экрана.

Если между горизонтально расположенными отклоняющими

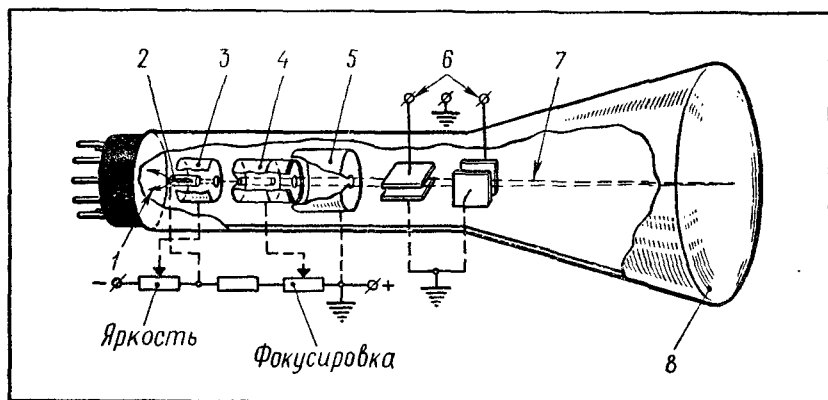


Рис. 111. Электронно-лучевая трубка:

1 — подогреватель; 2 — катод; 3 — управляющий электрод; 4 — первый анод; 5 — второй анод; 6 — управляющие пластины; 7 — электронный луч; 8 — люминесцирующий экран

пластинами подано напряжение U , то во время пролета между ними электрон движется с ускорением

$$a = \frac{F}{m} = \frac{eE}{m} = \frac{eU}{dm},$$

где e — заряд электрона, d — расстояние между пластинами. Через интервал времени $\Delta t = \frac{l}{v}$, в течение которого электрон движется между отклоняющими пластинами длиной l , проекция скорости электрона v_y становится равной:

$$v_y = a\Delta t = \frac{eUl}{mdv}.$$

За время движения от пластин до экрана $t = \frac{L}{v}$ электрон смещается в вертикальном направлении на расстояние

$$y = v_y t = \frac{eUlL}{mdv^2} = kU.$$

Коэффициент пропорциональности k в последнем выражении является для данного осциллографа величиной постоянной. Он называется чувствительностью пары отклоняющих пластин и выражается в мм/В.

Для определения чувствительности k вертикально отклоняющих пластин на них необходимо подать известное напряжение U_1 и измерить отклонение луча на экране осциллографа y_1 :

$$k = \frac{y_1}{U_1}.$$

Так как отклонение электронного луча y пропорционально напряжению U , приложенному между пластинами, при известной чувствительности осциллограф может быть использован как вольтметр для измерения как постоянных, так и быстро изменяющихся напряжений.

Главным достоинством электронного осциллографа как электроизмерительного прибора является его безынерционность. В каждый момент времени свечение экрана электронно-лучевой трубки вызывается ударами новых электронов. Смещение электронного луча определяется напряжением между отклоняющими пластинами в момент пролета электронов между ними. Так как электроны в трубке летят со скоростью, близкой к скорости света, при изменении напряжения между отклоняющими пластинами смещение луча изменяется практически без запаздывания в тот же момент, в какой происходит изменение напряжения.

Для исследования быстро переменных электрических процессов в осциллографе осуществляется развертка — равномерное перемещение электронного луча по горизонтали. Для того чтобы луч перемещался вдоль горизонтальной оси с постоянной скоростью,

напряжение на вертикально отклоняющих пластинах должно изменяться линейно во времени, а для возвращения луча в исходное положение напряжение должно падать до нуля. Такая форма напряжения носит название пилообразной.

Пилообразное напряжение на вертикальные отклоняющие пластины подается с выхода генератора развертки. Частота развертки может изменяться с помощью двух ручек на панели осциллографа. При совпадении частоты колебаний исследуемого сигнала с частотой генератора временной развертки электронный луч на экране осциллографа будет вычерчивать график изменения напряжения сигнала за период — осциллограмму напряжения.

Если частота генератора временной развертки будет в 2, 3 и т. д. раз меньше частоты колебаний исследуемого сигнала, то на экране осциллографа будет наблюдаться график двух, трех и т. д. полных колебаний.

Для исследования электрических сигналов с малой амплитудой изменений напряжения осциллограф имеет усилитель с регулируемым коэффициентом усиления.

Электронный осциллограф может быть использован не только для исследования изменений напряжения во времени. С помощью специальных преобразователей изменения любой физической величины могут вызвать изменения напряжения в электрической цепи и исследованы с помощью осциллографа. Например, используя микрофон, можно преобразовать колебания давления воздуха при распространении в нем звука в механические колебания диафрагмы микрофона, колебания диафрагмы вызывают колебательное движение связанной с ним катушки в поле постоянного магнита, а это движение катушки сопровождается возникновением переменного напряжения на ее концах. Присоединив выводы микрофона к входу электронного осциллографа, можно исследовать звуковые колебания.

Порядок выполнения работы

1. Поставьте ручки управления скоростью развертки в крайнее левое положение, ручку управления яркостью луча — в крайнее правое положение. Включите электронный осциллограф в сеть. Через 1—2 мин после включения на экране должна появиться светлая точка электронного луча. Если луч на экране не появился, выведите его на середину экрана, вращая ручки управления смещением луча по горизонтали и по вертикали. С помощью ручек управления яркостью луча и фокусировки получите на экране четкое и яркое пятно минимального размера.

2. Через гнезда «У» на задней панели осциллографа подайте постоянное напряжение от батареи БАС-70. Измерьте отклонение луча на экране y_1 и напряжение U_1 . По данным измерений определите чувствительность вертикально отклоняющих пластин:

$$k = \frac{y_1}{U_1}$$

3. Подайте на вход «У» на передней панели осциллографа переменное напряжение с выхода выпрямителя ВС-24. Переключатель «синхронизация» поставьте в положение «внутренняя». Включите развертку осциллографа и, изменяя ее скорость с помощью ручек ступенчатой и плавной регулировок, добейтесь получения на экране неподвижной осциллограммы. Зарисуйте осциллограмму переменного тока.

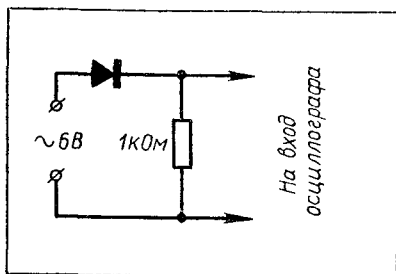


Рис. 112. Схема для наблюдения выпрямительного действия полупроводникового диода

4. Включите в цепь переменного тока диод по схеме, изображенной на рисунке 112. Регулировкой частоты развертки добейтесь получения устойчивой осциллограммы. Зарисуйте полученную осциллограмму.

5. Подключите к входу «У» на передней панели осциллографа выводы микрофона. Произнося перед микрофоном различные звуки, наблюдайте осциллограммы.

6. Поднеся к экрану электронно-лучевой трубки подковообразный магнит, убедитесь по направлению смещения светлого пятна на экране, что луч осциллографа представляет собой поток отрицательно заряженных частиц, отклоняющихся в магнитном поле.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

РАСЧЕТ И ИСПЫТАНИЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ФОТОРЕЗИСТОРОМ

З а д а н и е. Произведите расчет и испытание схемы автоматического управления, выключающей электрическую лампу при освещении фоторезистора.

Об о р у д о в а н и е: фоторезистор, электромагнитное реле, низковольтная электрическая лампа, источники тока, потенциометр.

У к а з а н и я. Схема автоматического устройства имеет входную и исполнительную цепи. В настоящем задании входная цепь должна состоять из последовательно соединенных полупроводникового фоторезистора, обмотки реле и источника тока. Исполнительную цепь можно составить из размыкающих контактов реле, соединенных последовательно с лампой накаливания и источником тока (рис. 113).

Для того чтобы фоторезистор вызывал значительные изменения силы тока во входной цепи схемы автоматического управления и реле срабатывало в зависимости от освещения фоторезистора,

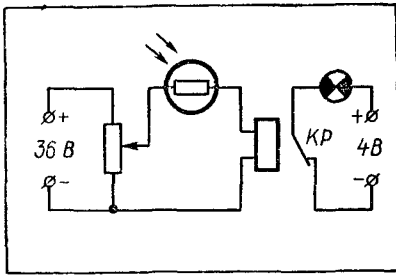


Рис. 113. Схема автоматического управления с фоторезистором

необходимо выбрать такое электромагнитное реле, сопротивление обмотки которого r значительно меньше сопротивления неосвещенного фоторезистора $R_{\text{темн}}$:

$$r \ll R_{\text{темн}}$$

Следующий шаг в расчете схемы связан с выбором реле по току срабатывания $I_{\text{сраб}}$. Очевидно, что ток срабатывания реле должен быть меньше максимального значения тока $I_{\text{сраб}}$ во входной цепи при освещении фоторезистора.

Максимальное значение силы тока $I_{\text{макс}}$ во входной цепи можно рассчитать, пренебрегая сопротивлением обмотки реле r и приняв максимальное значение напряжения $U_{\text{макс}}$. В качестве максимального значения напряжения во входной цепи согласно правилам техники безопасности следует принять напряжение 36 В. Тогда максимальное значение силы тока во входной цепи определится выражением:

$$I_{\text{макс}} = \frac{U_{\text{макс}}}{R_{\text{осв}}} = \frac{36 \text{ В}}{R_{\text{осв}}}$$

Зная силу тока $I_{\text{макс}}$, можно сделать выбор определенного типа реле, ток срабатывания которого $I_{\text{ср}}$ меньше силы тока $I_{\text{макс}}$.

По значениям тока срабатывания $I_{\text{ср}}$, сопротивления обмотки r выбранного реле, сопротивления освещенного фоторезистора $R_{\text{осв}}$ можно рассчитать напряжение, при котором реле срабатывает при освещении фоторезистора:

$$U_{\text{расч}} = I_{\text{сраб}} (R_{\text{осв}} + r).$$

Возможный вариант выполнения работы

1. Используя омметр, измерьте сопротивление фоторезистора $R_{\text{осв}}$ при его освещении и $R_{\text{темн}}$ при отсутствии освещения, а затем сопротивления r обмоток реле, имеющих в вашем распоряжении.

2. Измерьте токи срабатывания $I_{\text{сраб}}$ реле.

3. Рассчитайте максимальное значение силы тока $I_{\text{макс}}$ во входной цепи схемы автоматического управления с фоторезистором при напряжении 36 В:

$$I_{\text{макс}} = \frac{36 \text{ В}}{R_{\text{осв}}}$$

4. Из числа испытанных выберите реле, сопротивление обмотки которого r значительно меньше сопротивления неосвещенного фото-

резистора $R_{\text{темн}}$: $r \ll R_{\text{темн}}$ и ток срабатывания меньше максимального значения тока во входной цепи: $I_{\text{сраб}} < I_{\text{макс}}$.

5. Рассчитайте значение напряжения во входной цепи $U_{\text{расч}}$ необходимого для срабатывания выбранного реле при последовательном соединении его обмотки с освещенным фоторезистором:

$$U_{\text{расч}} = I_{\text{сраб}} (R_{\text{осв}} + r).$$

6. Соберите схему автоматического устройства (рис. 113). Установите с помощью потенциометра во входной цепи напряжение U , которое удовлетворяет условию:

$$U \geq U_{\text{расч}}.$$

7. Проведите испытания схемы. При освещении фоторезистора электрическая лампа в исполнительной цепи должна гаснуть, при отсутствии освещения — загораться.

Д о п о л н и т е л ь н о е з а д а н и е

Рассчитайте напряжение во входной цепи, при котором происходит отпускание контактов реле при затемненном фоторезисторе.

У к а з а н и я. Для работы автоматического устройства недостаточно обеспечить лишь условия срабатывания реле при освещении фоторезистора. Необходимо также, чтобы после прекращения освещения происходило размыкание контактов реле. Это условие будет выполнено, если при отсутствии освещения фоторезистора сила тока во входной цепи $I_{\text{темн}}$ будет меньше силы тока $I_{\text{отп}}$, при котором происходит отпускание контактов реле:

$$I_{\text{темн}} < I_{\text{отп}}.$$

Измерив для выбранного реле силу тока $I_{\text{отп}}$, при котором происходит размыкание контактов реле, и темновое сопротивление фоторезистора $R_{\text{темн}}$, можно рассчитать напряжение во входной цепи $U_{\text{отп}}$, при котором происходит отпускание контактов реле при затемненном фоторезисторе:

$$U_{\text{отп}} = I_{\text{отп}} (R_{\text{темн}} + r).$$

Источник тока, обеспечивающий нормальную работу автоматического устройства с данным фоторезистором и данным типом реле, должен иметь напряжение U , большее напряжения $U_{\text{сраб}}$, при котором реле сработает при определенных условиях освещения фоторезистора, и меньше напряжения $U_{\text{отп}}$, при котором происходит отпускание контактов реле при отсутствии освещения фоторезистора:

$$U_{\text{сраб}} < U < U_{\text{отп}}.$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА ПО ТОКУ В СХЕМЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Оборудование: транзистор, миллиамперметр на 30 мА, микроамперметр на 500 мкА, источник постоянного напряжения на 4 В, потенциометр на 500 кОм, резистор на 10—40 кОм.

Указания. Одним из важнейших параметров транзистора является коэффициент β , определяющий его усиление по току при включении по схеме с общим эмиттером. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для измерения параметра β представлена на рисунке 114. В усилительном каскаде с общим эмиттером входным током является ток базы I_b , а выходным — ток коллектора I_k . Коэффициент усиления по току в этом случае определяется выражением:

$$K_T = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \approx \frac{I_k}{I_b} \approx \beta. \quad (1)$$

В этой схеме ток базы I_b регулируют потенциометром R_1 на 500 кОм. Резистор $R_2 = 30$ кОм предназначен для ограничения тока базы при полном выведении потенциометра R_1 .

Силу тока базы и коллектора измеряют микроамперметром на 500 мкА и миллиамперметром на 30 мА, включенными в цепь базы и коллектора.

Порядок выполнения работы

1. Пользуясь справочником, определите расположение выводов транзистора (база, эмиттер, коллектор).

2. Выводы испытываемого транзистора подключите к электрической цепи, собранной на панели. Замкнув ключ K , подайте на схему постоянное напряжение 4 В от источника питания.

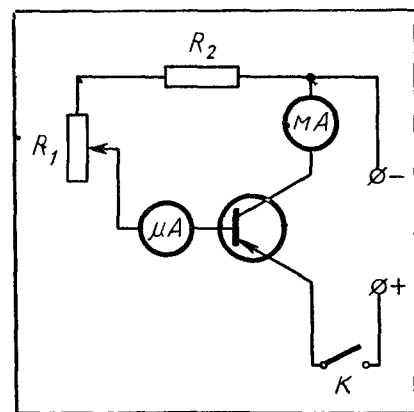


Рис. 114. Схема лабораторной установки для определения параметра β

3. С помощью потенциометра R_1 установите ток базы $I_b = 100$ мкА.

4. Измерьте ток коллектора I_k и по формуле (1) определите коэффициент усиления транзистора по току β в схеме включения с общим эмиттером.

5. Повторите измерения и вычисления для значений тока базы 200 мкА и 300 мкА.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

Отчетная таблица

№ п/п	I _к , мА	I _к мА	β ≈ $\frac{I_k}{I_б}$	β _{ср}
1	0,1			
2	0,2			
3	0,3			

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия транзистора как усилителя электрических сигналов?
2. Как определяется коэффициент усиления по току транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

З а д а н и е. Измерьте магнитный поток постоянного подковообразного магнита.

Об о р у д о в а н и е: подковообразный магнит, катушка из набора по электромагнетизму, гальванометр типа М-273/9 или школьный зеркальный гальванометр с дополнительным сопротивлением 5 кОм.

У к а з а н и я. Для измерения магнитного потока Φ можно воспользоваться явлением электромагнитной индукции. При быстром удалении контура из магнитного поля пронизывающий его магнитный поток изменяется от величины Φ до 0. ЭДС индукции, возникающая при этом в контуре, определяется выражением:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi}{\Delta t}.$$

При удалении из магнитного поля катушки, содержащей N витков, ЭДС индукции в ней в N раз больше, чем в контуре:

$$\mathcal{E} = N \frac{\Phi}{\Delta t}.$$

Если концы катушки замкнуты на гальванометр, то при удалении катушки из магнитного поля постоянного магнита в цепи протекает индукционный ток I . Разделив обе части уравнения на полное сопротивление цепи R , получим:

$$\frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{\Phi N}{R \cdot \Delta t}.$$

Так как

$$\frac{\mathcal{E}}{R} = I \text{ и } I \cdot \Delta t = \Delta Q,$$

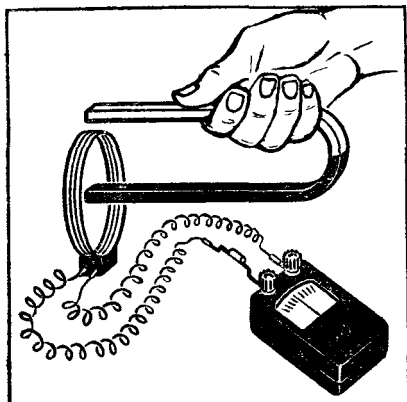


Рис. 115. Измерение магнитного потока постоянного магнита

то получим:

$$\Delta Q = \frac{\Phi N}{R}.$$

Последнее выражение показывает, что количество электричества, протекающего через катушку при удалении ее из магнитного поля, прямо пропорционально магнитному потоку Φ через контур, числу витков N в катушке и обратно пропорционально полному сопротивлению R цепи. Следовательно, для определения магнитного потока Φ необходимо измерить количество электричества ΔQ , протекающего в катушке при быстром удалении ее из исследуемой области магнитного поля:

$$\Phi = \frac{\Delta Q \cdot R}{N}.$$

Измерение величин R и N не представляет трудностей.

Для измерения количества электричества ΔQ применяется гальванометр, шкала которого предварительно проградуирована в кулонах на деление шкалы путем разрядки через него конденсатора известной емкости.

Порядок выполнения работы

1. Присоедините выводы катушки к клеммам гальванометра. Введите в катушку постоянный магнит таким образом, чтобы весь магнитный поток проходил через катушку (рис. 115).

2. Быстро удалите магнит из катушки и сделайте отсчет отброса n стрелки гальванометра. Повторите опыт пять раз и определите среднее значение отброса $n_{\text{ср}}$. По среднему значению отброса $n_{\text{ср}}$ стрелки гальванометра найдите количество заряда ΔQ , протекающего в цепи катушки.

3. Измерьте электрическое сопротивление катушки R_k и включенного последовательно с ней резистора $R_{\text{доп}}$, определите внутреннее сопротивление гальванометра R_g по его паспортным данным и найдите полное сопротивление R :

$$R = R_k + R_{\text{доп}} + R_g.$$

4. Используя найденные значения количества заряда ΔQ , полного сопротивления цепи R и числа витков N катушки, вычислите магнитный поток Φ постоянного магнита.

1. Зависит ли отброс стрелки гальванометра от скорости движения магнита или катушки? Проведите контрольные опыты и объясните их результаты.

2. Какими способами можно увеличить чувствительность лабораторной установки, использованной в данной работе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

З а д а н и е. Предложите способ определения индукции магнитного поля Земли и осуществите его на практике.

Об о р у д о в а н и е: рамка размером $0,5 \times 0,5$ м, на которой 100—200 витков медного провода, гальванометр типа М-273/9 или школьный зеркальный гальванометр с дополнительным сопротивлением 5 кОм, компас.

У к а з а н и я. Магнитное поле Земли на небольших расстояниях можно считать однородным. Поэтому для определения индукции B магнитного поля Земли можно выполнить измерения магнитного потока Φ , пронизывающего катушку с известной площадью поперечного сечения S , способом, аналогичным использованному при выполнении лабораторной работы № 10. Индукцию B магнитного поля можно найти, разделив магнитный поток Φ на площадь S :

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Delta Q \cdot R}{SN}.$$

Так как измерительную катушку невозможно выдернуть из магнитного поля Земли, для измерения индукции можно воспользоваться поворотом катушки в магнитном поле Земли на 180° . Если плоскость рамки была предварительно установлена перпендикулярно горизонтальной составляющей вектора индукции магнитного поля, то при повороте рамки на 180° происходит изменение пронизывающего ее магнитного потока на

$$\Delta\Phi_r = \Phi_r - (-\Phi_r) = 2\Phi_r,$$

и отброс стрелки гальванометра становится пропорциональным $2\Phi_r$:

$$2\Phi_r = \frac{\Delta Q \cdot R}{N}, \quad \Phi_r = \frac{\Delta Q \cdot R}{2N}.$$

Выражение для нахождения горизонтальной составляющей вектора индукции в этом случае принимает вид:

$$B_r = \frac{\Delta Q \cdot R}{2SN}.$$

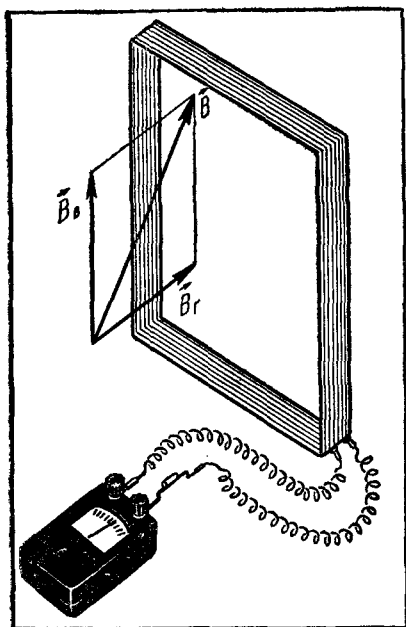


Рис. 116. Рамка в магнитном поле Земли

Расположив катушку в горизонтальной плоскости и осуществив поворот на 180° , найдем аналогично вертикальную составляющую вектора индукции. Полный вектор индукции магнитного поля в данном месте Земли \vec{B} можно найти как векторную сумму его составляющих \vec{B}_r и \vec{B}_v :

$$\vec{B} = \vec{B}_r + \vec{B}_v,$$

отсюда

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_v^2}.$$

Возможный вариант выполнения работы

1. Присоедините выводы катушки на рамке к гальванометру. Установите рамку вертикально и расположите ее плоскость перпендикулярно горизонтальной составляющей

вектора индукции магнитного поля Земли, ориентируясь по стрелке компаса (рис. 116).

2. Поверните рамку на 180° вокруг вертикальной оси и сделайте отсчет отброса стрелки гальванометра.

3. Повторите опыт пять раз и найдите среднее значение количества электричества ΔQ , протекающего через гальванометр при повороте рамки на 180° . Измерьте площадь рамки S . По измеренным значениям ΔQ и S и известному значению числа витков провода на рамке N вычислите горизонтальную составляющую вектора индукции магнитного поля Земли.

4. Проведите аналогичные измерения и расчеты для нахождения вертикальной составляющей вектора индукции магнитного поля Земли \vec{B}_v .

5. Определите индукцию магнитного поля Земли \vec{B} .

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

10. $n = 3,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $\rho = 1,4 \text{ Па}$.
11. $\rho = 83 \text{ Па}$; $\rho = 1,7 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$.
16. $m = 190 \text{ кг}$; $T = 4350 \text{ К}$.
17. $\rho \approx 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ Па}$; $\lambda = 3 \cdot 10^{13} \text{ м}$;
 $\tau \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ с} \approx 700 \text{ лет}$.
18. $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.
19. $\frac{v_2}{v_1} = 2$.
20. $5,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.
21. $h_1 = 140 \text{ м}$; $h_2 = 460 \text{ м}$.
22. $1,3 \text{ Дж}$.
31. $3 \cdot 10^5 \text{ м}$.
34. $\approx 22 \text{ Н}$ или 26 Н .
35. $1,7 \cdot 10^2 \text{ Дж}$.
37. $1,8 \cdot 10^8 \text{ Вт}$.
46. $6 \cdot 10^5 \text{ Кл}$.
47. $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$.
49. а) Уменьшится; б) увеличится.
50. а) Уменьшится в ϵ раз; б) увеличится в ϵ раз.
51. $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{2qrl}{\left(r^2 - \frac{l^2}{4}\right)^2} \approx \frac{ql}{2\pi\epsilon_0 r^3}$.
52. $R = 230 \text{ Ом}$; $N \approx 7 \cdot 10^8 \text{ Вт}$.
53. $F_M = 900 \text{ л (Н)}$. Учитывать взаимодействие необходимо.
54. $\frac{F_2}{F_M} = \frac{\epsilon_0 U_0}{v^2} = \frac{c^2}{v^2}$.
55. $E = vB$.
56. $r = 0,93 \text{ м}$; $h = 3,3 \text{ м}$.
57. $T = 1,53 \cdot 10^{-16} \text{ с}$; $B = 11 \text{ Т}$.

ОГЛАВЛЕНИЕ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Глава 1. Строение и превращения вещества

§ 1. Атомы и молекулы	3
§ 2. Число Авогадро	5
§ 3. Идеальный газ	7
§ 4. Давление идеального газа	8
§ 5. Газовый термометр	10
§ 6. Температура как мера средней кинетической энергии молекул	13
§ 7. Уравнение состояния идеального газа	14
§ 8. Реальные газы	15
§ 9. Средняя длина свободного пробега	17
§ 10. Диффузия и броуновское движение	19
§ 11. Сжижение газов	22
§ 12. Облака и осадки	24
§ 13. Зависимость агрегатного состояния вещества от температуры и давления	27
§ 14. Строение кристаллов	30
§ 15. Процессы роста кристаллов	35
§ 16. Получение монокристаллов	38
§ 17. Применения кристаллических тел	41
§ 18. Кристаллы и жизнь	45

Глава 2. Термодинамика

§ 19. Термодинамический метод	47
§ 20. Работа и количество теплоты в термодинамике	50
§ 21. Теплоемкость газов	53
§ 22. Теплоемкость твердых тел и жидкостей	57
§ 23. Потребление энергии	59
§ 24. Тепловые двигатели	60
§ 25. Рабочий цикл теплового двигателя	63
§ 26. КПД теплового двигателя	66
§ 27. Паровая машина	69
§ 28. Двигатель внутреннего сгорания	70
§ 29. Паровая и газовая турбины	76
§ 30. Реактивные двигатели	82
§ 31. Практикум по решению задач	91
§ 32. Лабораторные и практические задания	106

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Глава 3. Электрическое поле и электрический ток

§ 33. Электрическое поле	120
§ 34. Потенциал	125
§ 35. Диэлектрики и проводники в электрическом поле . .	129
§ 36. Свойства $p-n$ -перехода	135
§ 37. Транзистор	141

Глава 4. Магнетизм

§ 38. Магнитное взаимодействие движущихся зарядов . . .	147
§ 39. Магнитное поле	150
§ 40. Магнитное поле движущегося электрического заряда .	154
§ 41. Магнитное поле тока в вакууме	155
§ 42. Действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды	157
§ 43. Магнитная постоянная вакуума	159
§ 44. Электрические генераторы	160
§ 45. Электромагнитное поле	163
§ 46. Практикум по решению задач	164
§ 47. Лабораторные и практические задания	170

Глава 5. Физический практикум

Лабораторная работа № 1. Определение средней скорости теплового движения молекул воздуха	176
Лабораторная работа № 2. Определение молярной массы газа	179
Лабораторная работа № 3. Определение скорости роста кристаллов	181
Лабораторная работа № 4. Определение твердости стали до и после закалки	183
Лабораторная работа № 5. Определение характеристик холодильника	186
Лабораторная работа № 6. Поверка электроизмерительных приборов	187
Лабораторная работа № 7. Изучение электронного осциллографа	193
Лабораторная работа № 8. Расчет и испытание схемы автоматического управления с фогорезистором	197
Лабораторная работа № 9. Определение коэффициента усиления транзистора по току в схеме с общим эмиттером . .	200
Лабораторная работа № 10. Измерение магнитного потока постоянного магнита	201
Лабораторная работа № 11. Определение индукции магнитного поля Земли	203
Ответы к задачам	205

ИБ № 1708

*Олег Федорович КАБАРДИН,
Светлана Ильинична КАБАРДИНА,
Никодим Иванович ШЕФЕР*

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ

9 класс

Редактор *Л. Л. Величко*

Художник *Б. К. Мирошин*

Художественный редактор

В. М. Прокофьев

Технический редактор *Е. Н. Зелянина*

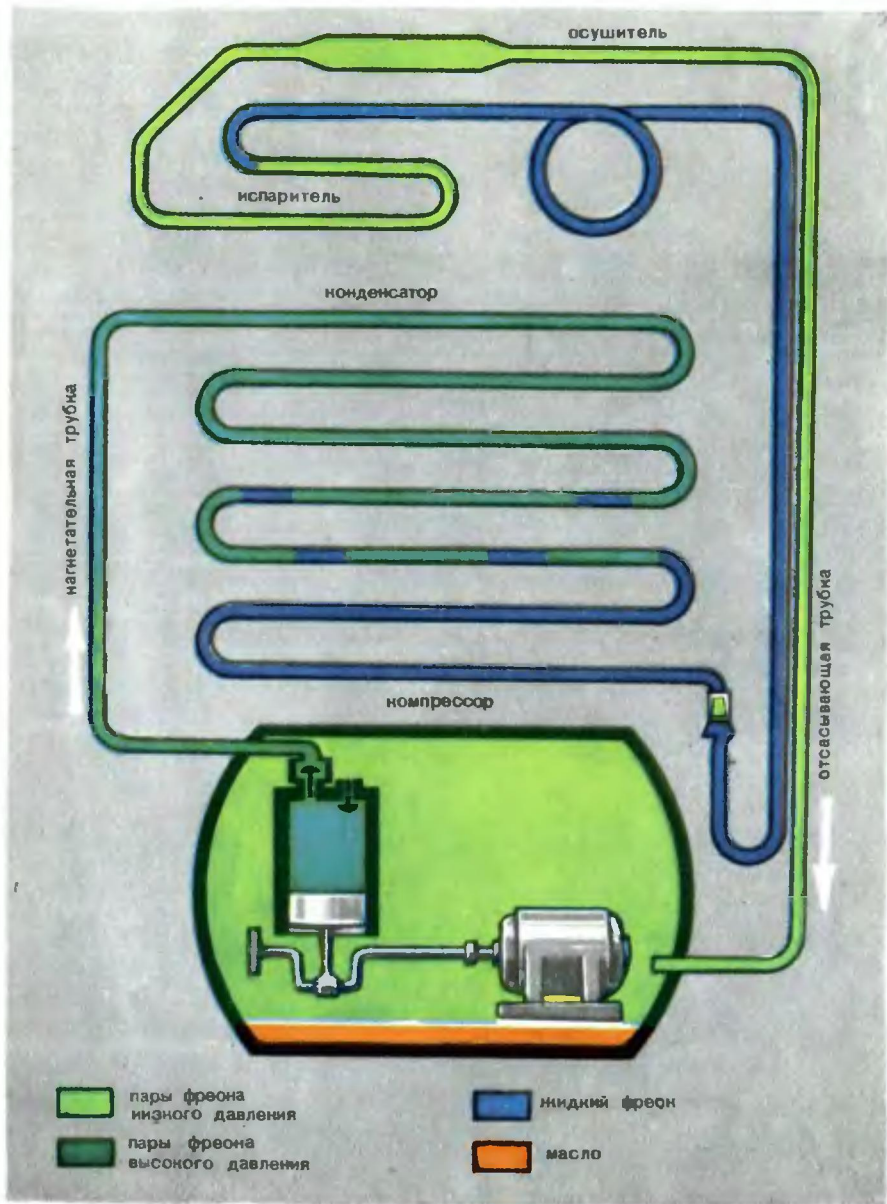
Корректоры *Т. А. Кузнецова,*

О. С. Захарова

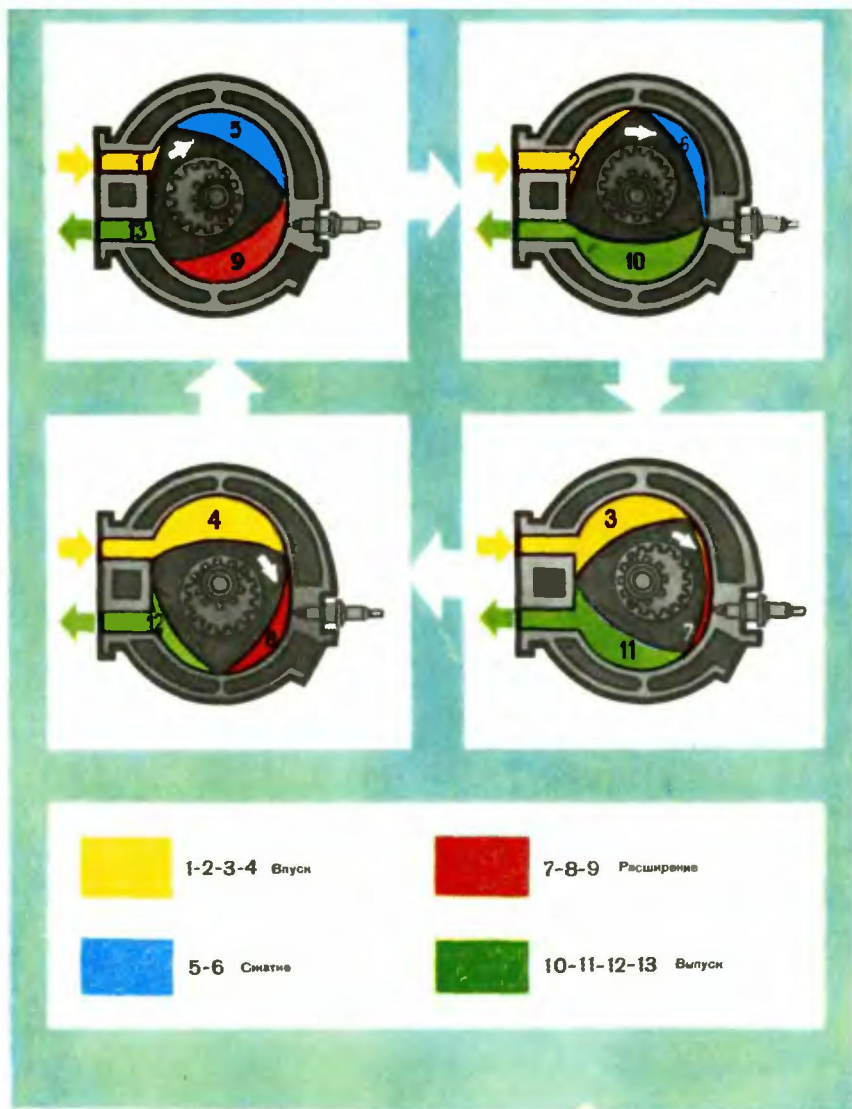
Сдано в набор 10.06.77. Подписано к печати 24.05.78. 60×90¹/₁₆. Бумага сыктыв. № 1. Литер. гарн. Высокая печать. Условн. печ. л. 13+0,5 вкл.+0,25 форзаца. Уч.-изд. л. 12,87+0,44 вкл.+0,45 форзаца. Тираж 200 000 экз. Заказ № 816. Цена 60 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета Совета Министров РСФСР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано с матриц Саратовского ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбината на Калининском ордена Трудового Красного Знамени полиграфкомбинате детской литературы им. 50-летия СССР Росглаволиграфпрома Госкомиздата Совета Министров РСФСР. Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.



1. Схема устройства компрессионного холодильника



II. Схема работы двигателя Ванкеля



III. Первый пассажирский реактивный самолет ТУ-104

Самолет-истребитель с турбореактивным двигателем, имеющим форсажную камеру

IV. Ракета «Восток»



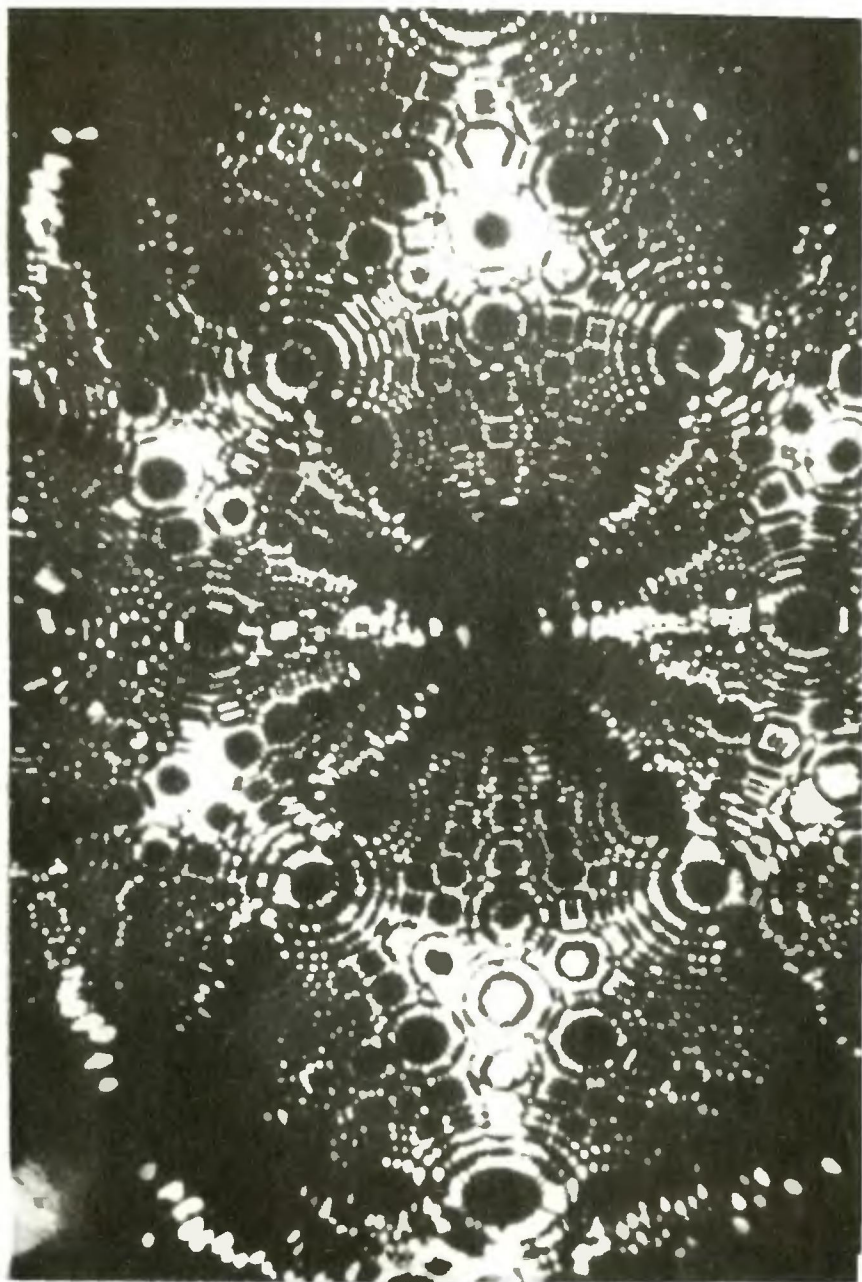


Фото 1. Фотография структуры кристалла вольфрама, полученная с помощью ионного микропроектора.



**Фото 2. Кристалл каменной соли
округлой формы**



Фото 3. Осколки, получившиеся после разрушения кристалла каменной соли

Фото 4. Стеклянная ограниченная бусина

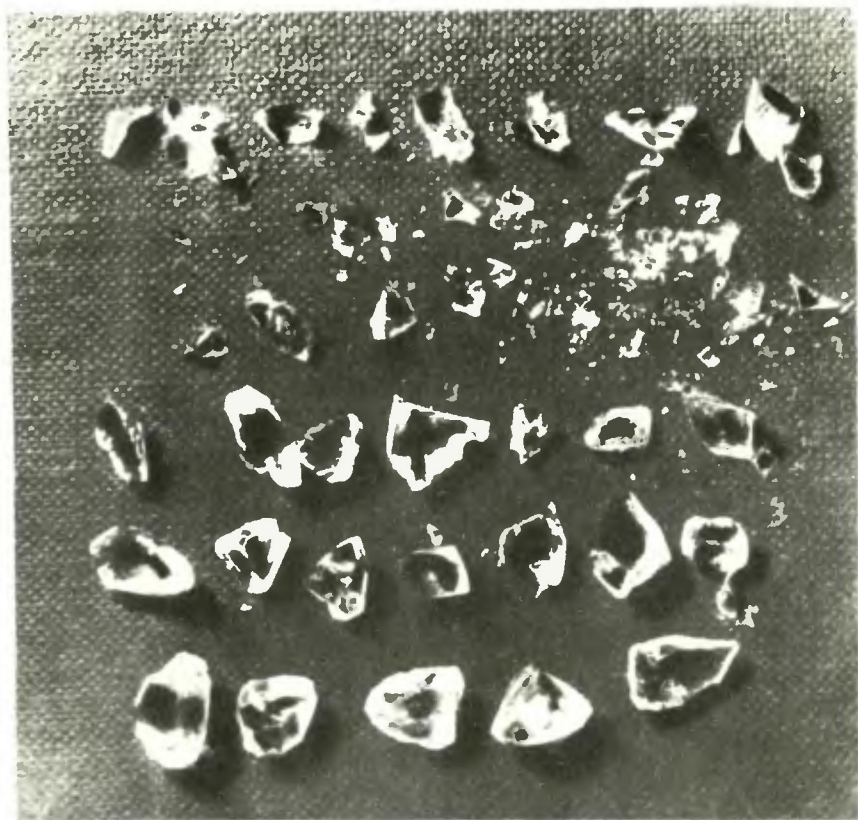


Фото 5. Осколки, получившиеся после разрушения стеклянной бусины

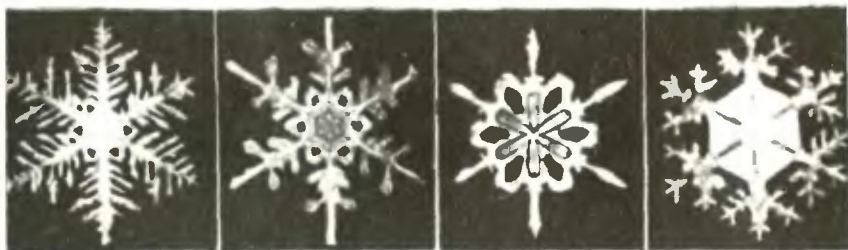


Фото 6. Фотографии снежинок



Фото 7. Фотография вируса, полученная на электронном микроскопе

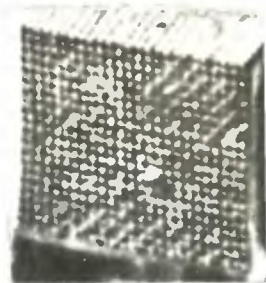


Фото 8. Фотография не большого кристалла белка вируса



Фото 9. Кристаллы сапфира