

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

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ

9 КЛАСС

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ УЧАЩИХСЯ

Рекомендовано
Главным управлением школ
Министерства просвещения СССР

Издание третье, переработанное



МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1986

Книга удостоена премии
Академии педагогических наук СССР
в 1982 г.

Рецензенты:
А. З. Синяков и Ф. А. Вульфсон, учителя физики

Кабардин О. Ф. и др.
К12 Факультативный курс физики: 9 кл. Учеб. пособие для
учащихся/О. Ф. Кабардин, С. И. Кабардина, Н. И. Шефер.—
3-е изд., перераб.— М.: Просвещение, 1986.— 239 с., ил.

Пособие содержит необходимый теоретический материал, примеры решения задач, задания для самопроверки и экспериментальные задания в соответствии с программой факультативного курса IX класса.

К 4306020000—297
103(03)—86

инф. письмо—86

ББК 22.3я72
53(075)

© Издательство «Просвещение», 1978, с изменениями
© Издательство «Просвещение», 1986, с изменениями

ГЛАВА I. СТРОЕНИЕ И ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

§ 1. АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ

Возникновение атомной теории строения вещества. Создателями учения об атомном строении вещества считаются древнегреческие 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:



Демокрит

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,

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

И, наконец, на морском берегу, разбивающем волны,
Платье сыреет всегда, а на солнце висит, 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...»

Хотя основные положения атомной теории строения вещества были сформулированы еще философами Древней Греции, широкого распространения атомистическая теория долгое время не получала. Такие ученые, как Г. Галилей, Р. Декарт, И. Ньютон, М. В. Ломоносов, считали, что материя состоит из мельчайших неделимых частиц, и называли эти частицы корпускулами или атомами. Но в их работах не было дано строгих доказательств существования атомов. Количественное обоснование атомистической теории было дано в 1803 г. Джоном Дальтоном, учителем из Манчестера (Англия).

При исследовании условий образования из углерода, кислорода и водорода таких соединений, как метан, этилен, углекислый газ и др., Дальтон открыл закон кратных отношений, который устанавливает следующее: *если простое вещество А соединяется с простым веществом В, образуя новые вещества С, D, ..., то при постоянной массе вещества А отношение масс вещества В в различных продуктах реакции составляет малые целые числа.*

Атомы и молекулы. Закон Авогадро. В 1808 г. французский физик Жозеф Луи Гей-Люссак экспериментально установил закон кратных отношений для химически взаимодействующих газов. Объемы газов, вступающих в химическое соединение, относятся как целые числа, например: 1:2, 1:3 или 2:3. Этот факт позволил предположить, что в равных объемах любых газов при одинаковых условиях находится одинаковое число молекул и атомов. Однако такое предположение не могло объяснить некоторых фактов. Например, при соединении одного объема хлора с одним объемом водорода образуется не один объем хлористого водорода, а два объема. Это противоречие было разрешено в 1811 г. итальянским физиком Амедео Авогадро формулировкой двух принципов:

1) все вещества, простые и сложные, образованы из молекул («составных молекул»), которые сами состоят из атомов («элементарных молекул»);

2) в равных объемах любых газов при одинаковых условиях содержится одно и то же число молекул.

Последнее утверждение называют законом Авогадро.

Относительные измерения масс атомов и молекул. Используя атомистическую теорию строения вещества, Джон Дальтон разработал простой способ определения относительных масс атомов. Он предложил за единицу измерения масс атомов принять массу одного атома водорода. Массу атома любого другого элемента можно найти из химической реакции соединения этого элемента с водородом. Если молекула нового химического элемента содержит равное количество атомов водорода и второго химического элемента (HCl, HF, C₂H₂ и т. п.), то число атомов водорода N_H , вступивших в соединение с элементом x , равно числу атомов этого элемента N_x , принявших участие в химической реакции: $N_H = N_x = N$.

Отношение массы элемента x к массе водорода, вступившего с ним в соединение, равно отношению массы атома m_x этого элемента к массе m_H атома водорода:

$$\frac{m_x N}{m_H N} = \frac{m_x}{m_H}$$

В настоящее время за единицу измерения массы атомов и молекул принимается $1/12$ массы атома углерода.

Постоянная Авогадро. Чтобы от измерений относительных значений масс атомов и молекул (показывающих, во сколько раз масса атома или молекулы данного вещества больше массы атома водорода или $1/12$ массы атома углерода) перейти к абсолютным измерениям, необходимо либо измерить массы отдельных атомов и молекул, либо сосчитать число атомов, например, в 1 г водорода.

В настоящее время массы атомов и молекул измеряют как первым, так и вторым способом. Исторически первым был осуществлен способ измерения масс молекул, связанный с нахождением их числа в теле известной массы.

Число молекул в одном моле вещества равно по модулю постоянной Авогадро; ее обозначают N_A .

Число N атомов или молекул в теле с количеством вещества ν моль равно:

$$N = \nu N_A.$$

Постоянная Авогадро является одной из важнейших постоянных в молекулярной физике. Экспериментальное определение этой постоянной было трудной задачей. Принципиальный путь решения этой задачи можно представить условно так: нужно взять 12 г углерода и отделять по одному атому до тех пор, пока не пересчитаешь все атомы.

Самый простой способ приблизительной оценки постоянной Авогадро основан на измерениях толщины пленки жидкости. Опыт показывает, что если на поверхность воды капнуть небольшую каплю нерастворимого в воде вещества (масла, керосина или кислоты и др.), то эта капля растекается по поверхности воды не беспрестанно. В опытах с каплями разного объема из одного

вещества площадь поверхности образованной пленки оказывается прямо пропорциональной объему капли. Это значит, что толщина пленки во всех опытах одинакова. Можно предположить, что жидкость растекается по поверхности воды до тех пор, пока толщина ее слоя не достигнет диаметра молекулы, т. е. слой становится мономолекулярным.

Разделив объем V капли на площадь S мономолекулярной пленки, получим толщину d или диаметр молекулы:

$$d = \frac{V}{S}.$$

Принимая объем молекулы примерно равным d^3 , найдем число молекул в капле:

$$N = \frac{V}{d^3}$$

и массу m_0 одной молекулы:

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

По известному значению молярной массы M вещества и найденному значению m_0 массы молекулы можно оценить постоянную Авогадро:

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

Существует несколько способов оценки значения постоянной Авогадро.

В 1909 г. английские физики Э. Резерфорд и Ройдс экспериментально 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 там вакуум. 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 $V_v = 22,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3$, можно определить постоянную Авогадро N_A . Для этого достаточно на основании закона Авогадро составить и решить уравнение

$$\frac{N}{V} = \frac{N_A}{V_v}; \quad N_A = \frac{NV_v}{V}.$$

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

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

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

Форма и размеры молекул. 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 порожденья 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,
Проникновеньем 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:

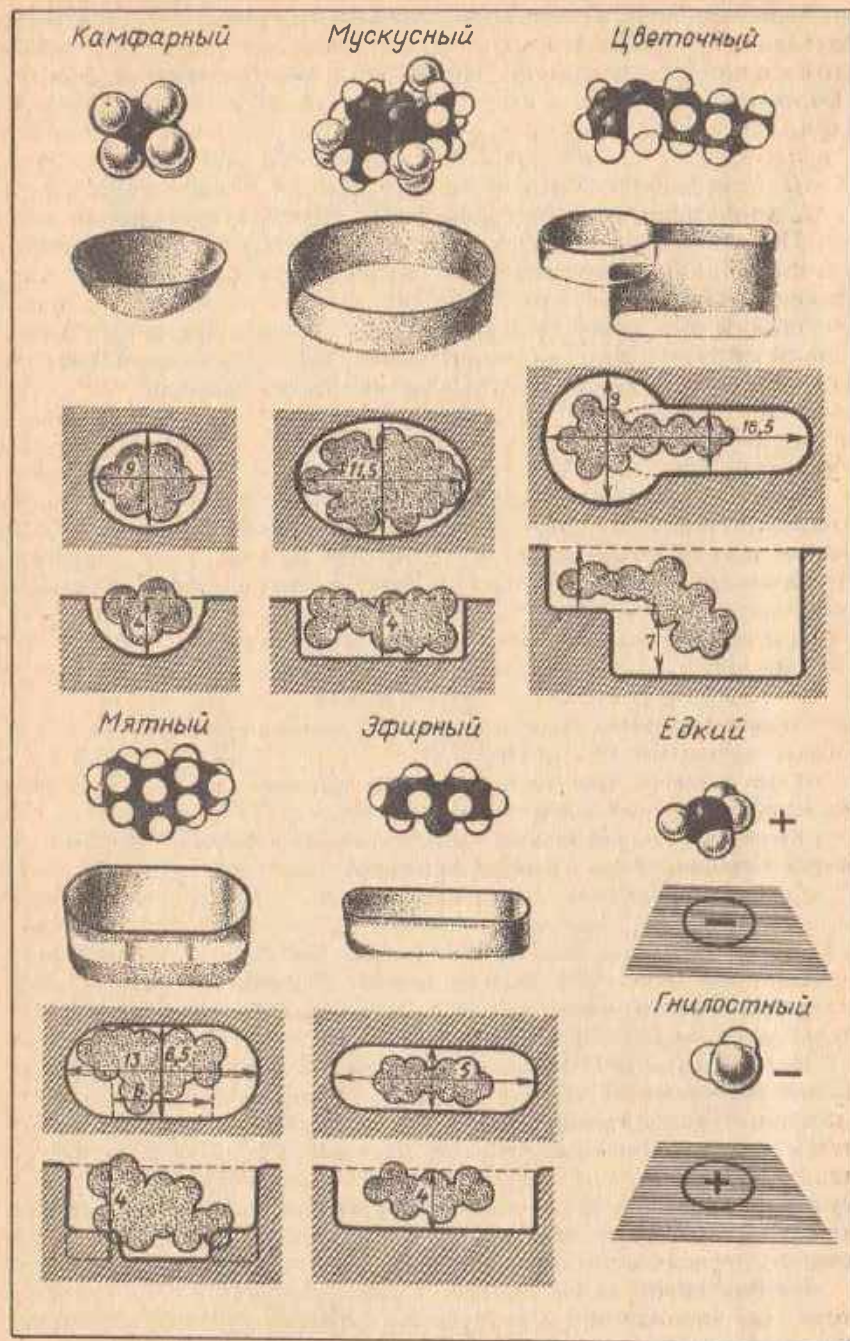


Рис. 1

«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 запахи 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.

Формы 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.

? Какие явления послужили основанием для создания древнегреческими учеными гипотезы о существовании атомов?

Каков вклад Д. Дальтона и А. Авогадро в развитие атомно-молекулярных представлений о строении вещества?

Каким способом может быть определена постоянная Авогадро? Одинаковы ли форма и размеры атомов и молекул разных веществ?

§ 2. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

Природа теплоты. Важным этапом в развитии и утверждении атомной теории строения вещества была разработка кинетической теории теплоты.

В XVII в. было высказано две гипотезы о природе теплоты. Согласно первой гипотезе теплота представляет собой особый вид материи — теплород. Содержание теплорода в теле определяет его температуру, процессы теплообмена обусловлены переходами теплорода из одного тела в другое. На основе представлений о существовании теплорода сформировались такие понятия, как «количество теплоты», «теплоемкость тела», «удельная теплоемкость вещества».

Вторая гипотеза о природе теплоты — корпускулярная гипотеза — объясняла все тепловые явления движением частиц, из которых состоят тела. Такие взгляды на природу теплоты высказы-

вали английский философ Френсис Бекон, французский ученый Рене Декарт. Значительный вклад в развитие и обоснование корпускулярной гипотезы о природе теплоты внес Михаил Васильевич Ломоносов. В 1745 г. он дал объяснение явлений теплопроводности, плавления, испарения и ряда других на основе представлений о природе теплоты как вращательном движении частиц, из которых состоят тела.

Из кинетических представлений о природе теплоты следует вывод о существовании самой низкой температуры тела, соответствующей абсолютному покою составляющих его частиц. М. В. Ломоносов первым обосновал вывод о существовании такой температуры — *абсолютного нуля*.

Важные эксперименты, опровергающие теплородную гипотезу, были выполнены в 1798 г. английским физиком Бенджаменом Румфордом. Он исследовал известное явление нагревания тел при трении. Так как согласно теплородной теории теплота не создается и не исчезает, а только переходит из одного тела к другому, выделение тепла при трении объясняли тем, что при трении отрываются мелкие части тела, имеющие меньшую удельную теплоемкость, и при этом выделяется теплота.

Румфорд установил, что при сверлении пушечного ствола тупым сверлом выделяется такое количество теплоты, что никакими изменениями теплоемкости стружек этого нельзя было объяснить. В специальном опыте он установил также, что удельная теплоемкость стружек при сверлении в действительности не отличается от удельной теплоемкости целого куска металла. Особенно большое впечатление на современников Румфорда произвел опыт, когда в ящик с водой был помещен пушечный ствол при сверлении и через два с половиной часа после начала сверления без нагрева огнем вода закипела. На основании этих опытов Румфорд пришел к выводу о несостоятельности теплородной гипотезы: «Я должен признать, что результаты всех моих экспериментов не приводят ни к какому иному выводу... что теплота не что иное, как колебательное движение частиц тела».

Кинетическая теория газов. Для дальнейшего развития атомной гипотезы строения вещества необходимо было от объяснения природных явлений на качественном уровне перейти к созданию научной теории. Научная теория требует четкого выделения основных понятий и исходных положений, являющихся обобщением опытных фактов, выявления существенных связей между физическими величинами, получающих выражение в форме физических законов. Из основных положений теории и ее законов должны быть сделаны выводы о явлениях или закономерностях, неизвестных ранее и доступных экспериментальной проверке.

В развитии атомной гипотезы строения вещества первые значительные успехи были достигнуты кинетической теорией газов. При ее создании в основу были положены следующие экспериментально установленные факты:

1) газы способны к неограниченному расширению и занимают любой предоставленный им объем;

2) смесь газов оказывает давление на стенки сосуда, равное сумме давлений каждого из газов, взятых в отдельности, т. е. каждый газ оказывает на стенки сосуда независимое действие:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n; \quad (2.1)$$

этот закон открыт Дальтоном в 1802 г.;

3) при постоянной температуре давление газа обратно пропорционально его объему:

$$pV = \text{const}; \quad (2.2)$$

этот закон в 1660 г. был открыт английским физиком Робертом Бойлем и независимо от него в 1676 г. французским ученым Эдмандом Мариоттом;

4) при постоянном объеме давление газа зависит от температуры:

$$p_t = p_0(1 + \alpha t), \quad (2.3)$$

где p_t — давление газа при температуре $t^\circ\text{C}$, p_0 — давление газа при температуре 0°C , α — термический коэффициент давления, одинаковый для всех газов и равный, по современным измерениям,

$$\alpha = \frac{1}{273,15};$$

эта зависимость давления газа от температуры открыта в 1787 г. французским физиком Жаком Шарлем;

5) при постоянном давлении объем газа зависит от температуры:

$$V_t = V_0(1 + \alpha t), \quad (2.4)$$

где V_t — объем газа при температуре $t^\circ\text{C}$, а V_0 — объем газа при температуре 0°C , α — термический коэффициент объемного расширения, одинаковый для всех газов и равный, по современным измерениям,

$$\alpha = \frac{1}{273,15}.$$

Эта зависимость объема газа от температуры в 1802 г. была установлена французским ученым Гей-Люссаком.

Первым шагом на пути построения физической теории может быть создание мысленной модели объекта теоретического описания. Любая мысленная модель реального объекта обязательно является упрощением действительности и поэтому имеет определенные границы применимости, в пределах которых она может с успехом использоваться для описания известных свойств и предсказания новых, ранее неизвестных следствий теории.

Примером абстрактной модели, использованной для теоретиче-

ского объяснения природы теплоты, могут служить представления М. В. Ломоносова о строении вещества. Он считал, что вещества состоят из корпускул, находящихся во вращательном движении, температура тела связана с вращательным движением атомов — корпускул.

Английский физик Джеймс Джоуль в 1852 г. уточнил модель, предложенную М. В. Ломоносовым, приписав атомам газа поступательное движение. На основе этого предположения он теоретически вывел закон Бойля — Мариотта, вычислил скорость теплового движения молекул, определил температуру абсолютного нуля. В 1856 г. немецкий физик А. Крениг, рассматривая газ как совокупность хаотически движущихся упругих шариков, пришел к выводу, что кинетическая энергия молекул пропорциональна температуре, отсчитанной от абсолютного нуля, и вывел на основании применения этой модели закон Авогадро.

В 1857 г. немецкий физик Рудольф Клаузиус дал первое систематическое изложение кинетической теории газов. Он ввел понятия о средних величинах, длине свободного пробега молекул, впервые вычислил давление газа на стенки сосуда и среднюю длину пути между двумя столкновениями молекул.

Давление газа. Р. Клаузиус в своих работах дал теоретическое объяснение способности газов расширяться и давить на стенки сосудов. Он писал: «Новая теория газов, получившая название кинетической, допускает, что молекулы газов не колеблются около определенных положений равновесия, но движутся прямолинейно с постоянной скоростью до тех пор, пока не ударятся о другие молекулы газа или же о непроницаемую стенку; вследствие отражения они получают новые направления движения, причем, однако, живая сила (т. е. кинетическая энергия) их движения в среднем сохраняет ту же величину, какую она имела до столкновения...»

Действие каждого удара вследствие малой массы молекулы очень незначительно, но зато число ударов, приходящихся в течение единицы времени даже на самый малый элемент поверхности, доступной нашему наблюдению, очень велико. Отсюда для нашего восприятия создается ложное впечатление, будто стенка получает сообщенное ей количество движения не благодаря отдельным толчкам, а под влиянием постоянно действующей силы, направленной изнутри наружу. Эта сила и есть та самая, которую мы называем давлением».

При выводе уравнения, определяющего давление газа, Р. Клаузиус использовал модель идеального газа. Идеальным газом он назвал газ, удовлетворяющий следующим условиям:

- 1) объем всех молекул газа ничтожно мал по сравнению с объемом сосуда, в котором он находится;
- 2) время одного столкновения пренебрежимо мало по сравнению со временем между двумя столкновениями;
- 3) молекулы взаимодействуют между собой только силами отталкивания при непосредственном соприкосновении.

Рассматривая идеальный газ, для упрощения можно не учитывать взаимных столкновений молекул и считать, что они движутся равномерно и прямолинейно до столкновения со стенками сосуда.

Давление идеального газа. Используя модель идеального газа, вычислим давление газа на стенку сосуда. Рассмотрим следующий простой случай.

Пусть в сосуде кубической формы с ребром a находится N одинаковых молекул, масса каждой молекулы m . Молекулы движутся хаотически, направление вектора скорости каждой молекулы произвольно. Выберем координатные оси Ox , Oy и Oz , направленные параллельно ребрам куба (рис. 2).

Столкновения между молекулами будем считать маловероятными, а столкновения со стенками сосуда — упругими. Тогда от одного столкновения молекулы со стенкой, перпендикулярной оси Ox , до следующего пройдет интервал времени τ :

$$\tau = \frac{2a}{v_x},$$

за который молекула долетит до противоположной стенки, отразится от нее и возвратится к первой стенке. Изменение импульса молекулы при упругом столкновении со стенкой сосуда равно:

$$\Delta(mv_x) = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x.$$

За 1 с молекула испытывает ν столкновений с одной стенкой:

$$\nu = \frac{1}{\tau} = \frac{v_x}{2a}.$$

Изменение импульса молекулы в результате этих столкновений равно импульсу силы, действующей на стенку:

$$\nu(\Delta mv_x) = F_x \Delta t, \text{ или } \nu \cdot 2mv_x = F_x \Delta t, \quad (2.5)$$

где F_x — среднее значение силы, действующей на стенку сосуда в результате ударов одной молекулы.

Так как $\nu = \frac{v_x}{2a}$ и $\Delta t = 1$ с, то из уравнения (2.5) следует:

$$\frac{mv_x^2}{a} = F_x.$$

Разделив среднее значение силы F_x на площадь стенки сосуда,

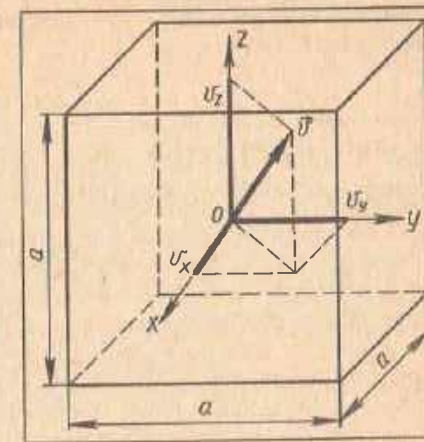


Рис. 2

получим выражение, определяющее давление, создаваемое одной молекулой газа:

$$p_i = \frac{F_x}{S} = \frac{mv_{x_i}^2}{a \cdot a^2} = \frac{mv_{x_i}^2}{a^3}. \quad (2.6)$$

Все N молекул газа создают давление на стенку сосуда, равное сумме давлений от каждой молекулы:

$$p = \sum p_i = \sum \frac{mv_{x_i}^2}{a^3} = \frac{m}{a^3} \sum v_{x_i}^2. \quad (2.7)$$

Введем обозначение

$$\overline{v_x^2} = \frac{\sum v_{x_i}^2}{N},$$

где $\overline{v_x^2}$ — средний квадрат проекции скорости молекул. Тогда для давления газа получаем выражение

$$p = \frac{m \overline{v_x^2} N}{a^3} = n m \overline{v_x^2}, \quad (2.8)$$

где n — концентрация молекул газа (так как a^3 — объем сосуда).

Модуль скорости v молекулы связан с модулями его проекций на координатные оси выражением

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2. \quad (2.9)$$

Так как все направления для векторов скоростей молекул равновероятны, средние значения квадратов модулей их проекций на координатные оси равны между собой:

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

Отсюда следует, что

$$\overline{v^2} = 3\overline{v_x^2},$$

и для давления газа получаем:

$$p = \frac{1}{3} n m \overline{v^2}. \quad (2.10)$$

Давление газа равно одной трети произведения концентрации молекул на массу молекулы и средний квадрат скорости теплового движения молекул.

Уравнение (2.10) называют уравнением Клаузиуса или основным уравнением молекулярно-кинетической теории газов.

Произведя в этом уравнении замену:

$$\bar{E} = \frac{m \overline{v^2}}{2}, \quad (2.11)$$

получим:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}, \quad (2.12)$$

т. е. *давление идеального газа равно $\frac{2}{3}$ произведения концентрации молекул n на среднее значение кинетической энергии хаотического поступательного движения молекул $\bar{E}$.*

Таким образом, используя модель идеального газа, мы установили связь одного макроскопического параметра газа, его давления p на стенки сосуда, с микроскопическими параметрами — массой m молекулы, концентрацией молекул n и средним квадратом скорости их хаотического движения $\overline{v^2}$ или средним значением кинетической энергии $\bar{E}$ теплового движения.

Выразив плотность вещества через концентрацию n молекул и их массу m :

$$\rho = n m, \quad (2.13)$$

можно получить еще один вид уравнения для вычисления давления газа:

$$p = \frac{1}{3} \rho \overline{v^2}. \quad (2.14)$$

Распределение молекул по скоростям. Следующим этапом развития молекулярно-кинетической теории газов стала работа английского физика Дж. Максвелла «Пояснения к динамической теории газов», опубликованная в 1860 г. На примере этой работы можно ознакомиться с образцом построения научной физической теории с использованием метода моделей. В этой работе Максвелл писал: «Я выведу законы движения неограниченного числа маленьких, твердых и совершенно упругих сфер, действующих друг на друга только во время столкновения. Если свойства такой системы тел окажутся соответствующими свойствами газов, то тем самым будет установлена важная физическая аналогия, которая может способствовать более глубокому пониманию свойств вещества. Если же эксперименты, выполненные с газами, не согласуются с гипотезой, положенной в основу предложений, тогда будет доказано, что наша теория, хотя и является последовательной сама в себе, не способна объяснить свойства газов. В обоих случаях необходимо проследить выводы из этой гипотезы. Вместо того чтобы говорить, что все частицы тверды, шарообразны и упруги, можно, если угодно, сказать, что эти частицы являются центрами силы, действие которой ощутимо лишь на некотором малом расстоянии, где она проявляется внешне в виде очень интенсивной силы отталкивания».

В этой работе Максвелл пришел к выводу: молекулы газа движутся с различными скоростями, тогда как ранее в расчетах скорости молекул принимали одинаковыми. При столкновениях молекул направления и модули векторов их скоростей изменяют-

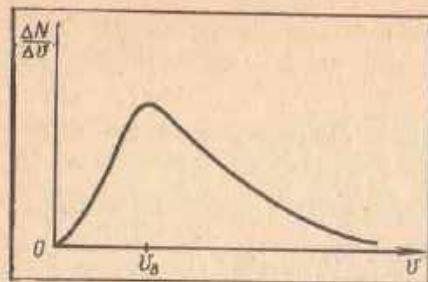


Рис. 3

ся, но интервал возможных значений скоростей остается неизменным. Теоретически выведенный Дж. Максвеллом закон распределения молекул газа по скоростям был важным следствием молекулярно-кинетической теории.

Скорости молекул газа по расчетам Максвелла должны распределяться от нуля до бесконечности (рис. 3). По оси абсцисс отложены значения

скорости молекул, по оси ординат — отношение числа молекул, обладающих скоростями в интервале скоростей Δv , к этому интервалу.

Австрийский физик Людвиг Больцман доказал, что в газе, находящемся в поле земного тяготения, температура не будет изменяться с высотой, а изменяться будет лишь плотность газа.

- ? Какие гипотезы о природе теплоты были высказаны в XVII в?
 Результаты каких опытов не могла объяснить теплородная гипотеза?
 Какие основные опытные факты лежат в основе молекулярно-кинетической теории газов?
 Какая модель использована при создании молекулярно-кинетической теории?
 Какие упрощающие предположения о свойствах газа использованы при выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории?

§ 3. ТЕМПЕРАТУРА КАК МЕРА СРЕДНЕЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Температура. Температура двух тел считается одинаковой, если при соприкосновении между ними не происходит теплопередачи, устанавливается тепловое равновесие. При нагревании или охлаждении тел происходят изменения различных их физических характеристик — объема, давления, электрического сопротивления и др. Поэтому о наступлении теплового равновесия тел, приведенных в тепловой контакт, можно судить по прекращению изменений, например, объема или давления.

Газовый термометр. Экспериментально установленный Шарлем факт одинакового изменения давления любых газов при одинаковом нагревании позволяет разработать способ измерения температуры, не связанный с физическими свойствами одного какого-либо вещества. В этом случае давление газа принимают за количественную меру его температуры. Прибор для измерения температуры по давлению газа называют *газовым термометром*.

Газовый термометр представляет собой закрытый сосуд, за-

полненный гелием или азотом и соединенный с устройством для измерения давления (рис. 4). Если за температуру газа принять некоторую физическую величину, прямо пропорциональную давлению газа при постоянном объеме, то можно записать уравнение:

$$p = p_0 \alpha T, \quad (3.1)$$

где T — температура газа, p_0 — давление газа при температуре таяния льда при нормальном давлении, α — некоторый постоянный коэффициент. Температуру, определяемую выражением (3.1), называют *абсолютной температурой*.

Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов (2.10) следует, что при уменьшении скорости теплового движения молекул до нуля давление газа должно стать равным нулю, а из уравнения (3.1) — что абсолютная температура при этом равна нулю или при абсолютном нуле температуры давление идеального газа равно нулю.

Постоянный α в выражении (3.1) можно было бы выбрать произвольно, но чтобы единица измерения температуры осталась неизменной (привычной), эту единицу по абсолютной шкале, названную кельвином, приняли равной одному градусу по шкале Цельсия. Тогда значение коэффициента α в уравнении (3.1) при таком выборе единицы измерения температуры равно:

$$\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ K}^{-1}.$$

Следовательно, температура таяния льда по абсолютной шкале равна 273,15 К или 0°C.

В настоящее время для более точного воспроизведения измерений температуры в качестве опорной точки при определении абсолютной шкалы температуры выбрана температура тройной точки воды, при которой в равновесии находятся водяной пар, вода и лед. Температура тройной точки воды на 0,01 К выше температуры таяния льда при нормальном давлении и равна 273,16 К.

Связь между температурой и кинетической энергией молекул. Из основного уравнения молекулярно-кинетической теории (2.12) и уравнения (3.1) следует, что средняя кинетическая энергия молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} \frac{p}{n} = \frac{3p_0 \alpha}{2n} T. \quad (3.2)$$

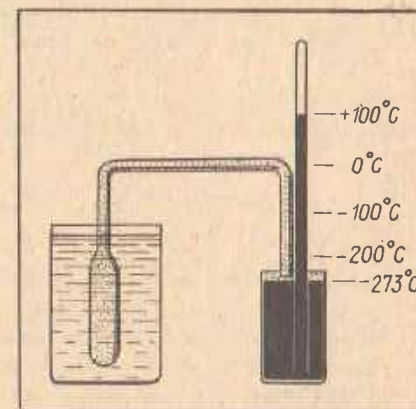


Рис. 4

Уравнение (3.1) определяет температуру газа при условии постоянного объема. В этом случае в уравнении (3.2) p_0 и n постоянны, следовательно, множитель перед абсолютной температурой в правой части уравнения является величиной постоянной.

Обозначив

$$k = \frac{p_0 \alpha}{n}, \quad (3.3)$$

получаем:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (3.4)$$

Постоянную k в уравнении (3.4) называют *постоянной Больцмана*.

Из принятого определения понятия температуры и основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов следует, что средняя кинетическая энергия теплового движения молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре газа.

Таким образом, на основе молекулярно-кинетической теории можно дать 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 этого можно воспользоваться любым значением p_0 и соответствующим ему значением n .

Используем известные сведения о газе при нормальных условиях: $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $\alpha = \frac{1}{273,15} \text{ К}^{-1}$, $n = \frac{N_A}{V_0}$. Тогда

$$k = \frac{p_0 \alpha}{n} = \frac{p_0 V_0 \alpha}{N_A} = \frac{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 273,15 \text{ К}} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}.$$

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

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

- ?
- Каким способом можно узнать, одинакова ли температура двух тел?
 - Как устроен газовый термометр?
 - В чем преимущество газового термометра перед жидкостным?
 - Как определяют абсолютную температуру?
 - Какая температура выбрана в качестве опорной точки при определении абсолютной шкалы температуры?
 - Каков физический смысл постоянной Больцмана?

§ 4. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Уравнение состояния идеального газа. Используя основное уравнение молекулярно-кинетической теории (2.12) и уравнение (3.4), 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

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{3} n \cdot \frac{3}{2} kT = nkT = \frac{m N_A}{VM} kT.$$

Обозначив $N_A k = R$, получим выражение, называемое уравнением состояния идеального газа или *уравнением Менделеева — Клапейрона*:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (4.1)$$

Постоянную R в этом выражении называют *молярной газовой постоянной*. Ее значение равно:

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

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 импульс, передаваемый 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 — на величину, обратно пропорциональную квадрату занимаемого газом объема V .

Уравнение состояния для одного моля идеального газа ($\nu = 1$ моль) можно записать в виде

$$p = \frac{RT}{V}. \quad (4.2)$$

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

$$p = \frac{RT}{V} - \frac{a}{V^2}. \quad (4.3)$$

или

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) V = RT, \quad (4.4)$$

где a — постоянная, зависящая от вида газа (первая поправка).

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 значение их может быть большим. Но эти силы действуют как во время приближения молекулы к стенке, так и во время ее удаления от стенки, их влияние на процесс взаимодействия молекулы со стенкой сосуда в конечном счете оказывается нулевым и поэтому не учитывается.

Вторую поправку в уравнение, описывающее состояние реаль-

ного 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:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) (V - b) = RT. \quad (4.5)$$

Это уравнение называют *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.

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 называют длину пути, пройденного ею между двумя последовательными столкновениями (рис. 5). 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 вели-

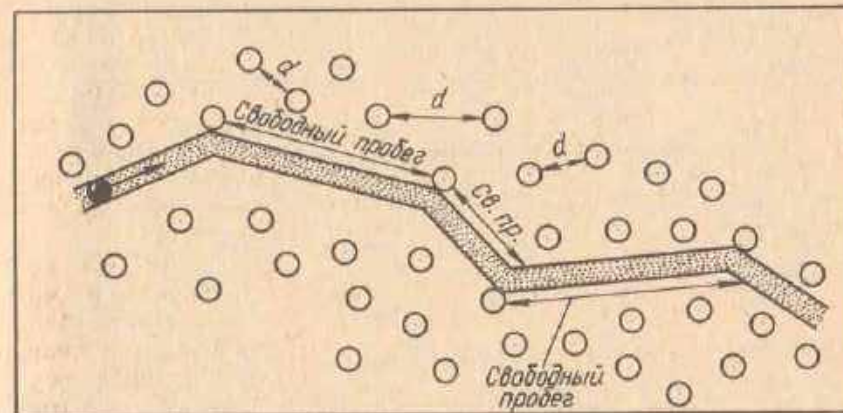


Рис. 5

чиной 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 соударения с ней испытывают все молекулы, 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. 6) столкнулась бы лишь с молекулами 2 и 6, центры которых лежат внутри цилиндра радиусом $2r$. Молекулы 3, 4, 5, 7 столкновения с молекулой 1 не испы-

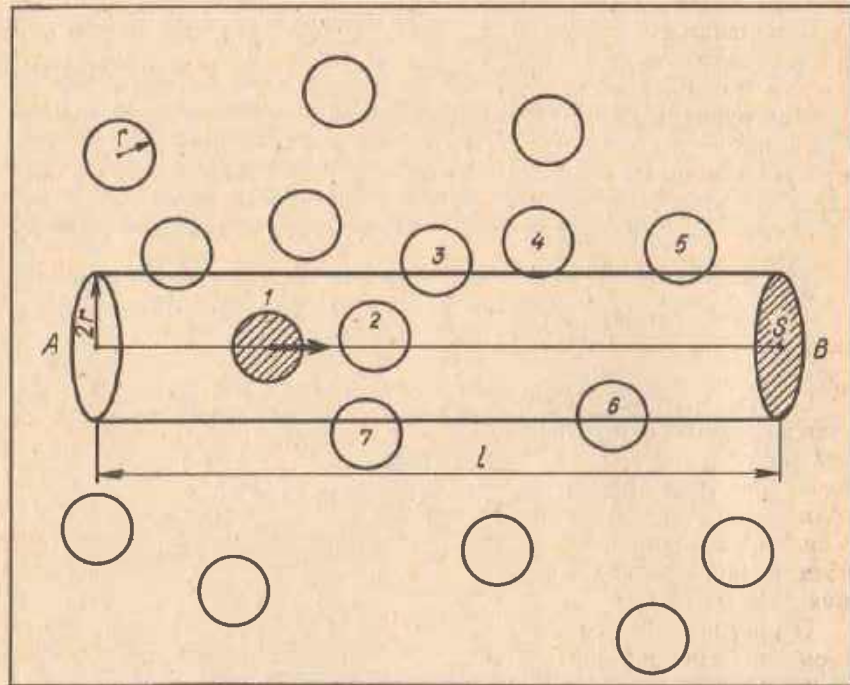


Рис. 6

тали 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 радиусом $R = 2r$ и длиной $l = \bar{v} \cdot 1$ с. Очевидно, что это число ν можно определить как произведение объема цилиндра $V_{\text{ц}}$ на концентрацию молекул газа:

$$\nu = V_{\text{ц}} n = S l n = \pi (2r)^2 \bar{v} n = 4\pi r^2 \bar{v} n. \quad (4.6)$$

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

$$\lambda = \frac{l}{\nu} = \frac{\bar{v} \cdot 1 \text{ с}}{4\pi r^2 \bar{v} n} = \frac{1}{4\pi r^2 n}. \quad (4.7)$$

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 (4.7) 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.

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 «топтанье» 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 и 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 «толкуются» 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

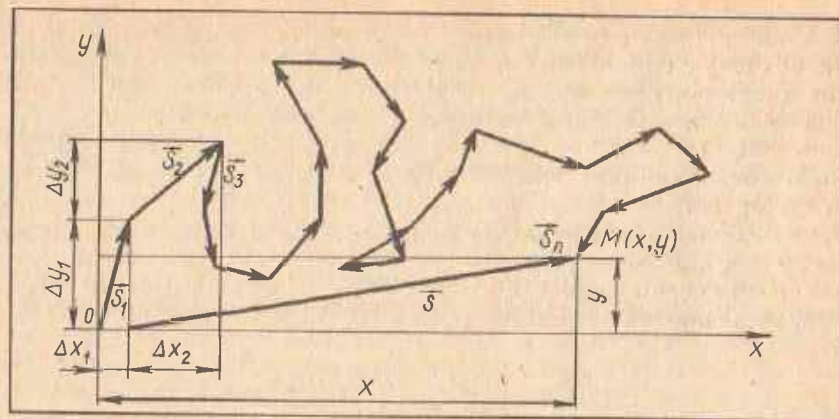


Рис. 7

происходит в плоскости xOy . 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. 7). Вектор перемещения $\vec{s}$ является результатом сложения векторов $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \vec{s}_3, \dots, \vec{s}_n$, каждый из которых представляет собой вектор перемещения молекулы между двумя последующими столкновениями.

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 модулю их значения лежат в пределах от нуля до λ^2 , при достаточно большом числе слагаемых их сумма с большой степенью точности может считаться равной нулю. Сумму остальных слагаемых можно представить как сумму n квадратов перемещений молекулы, которая по определению равна произведению числа n на квадрат средней длины свободного пробега λ :

$$\begin{aligned} s &\approx \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 + \dots + s_N^2} \approx \sqrt{N\lambda^2}, \\ s &= \sqrt{N \cdot \lambda}. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Таким образом, мы получили, что модуль перемещения молекулы s 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 молекул v определяется выражением

$$s = \sqrt{N \cdot \lambda} = \sqrt{\frac{vt}{\lambda}} \cdot \lambda = \sqrt{v t \lambda}. \quad (4.9)$$

Полученное соотношение позволяет определять среднюю длину свободного пробега газовых молекул λ за известное время t по экспериментально полученному значению модуля перемещения s и вычисленной средней скорости их движения v .

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 1 с равно:

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

При нормальных условиях молекула газа пробегает за 1 с 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.

? Почему уравнение состояния реального газа отличается от уравнения состояния идеального газа?

От чего зависит средняя длина свободного пробега молекул газа?

Какова зависимость модуля перемещения молекулы при хаотическом тепловом движении от времени?

§ 5. РЕШАЮЩИЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Для принятия теоретической гипотезы в качестве научной физической теории недостаточно ее полного согласия со всеми известными опытными фактами, так как именно эти факты и лежат в основе теории. Важным этапом в развитии гипотезы в научную теорию является предсказание нового, неизвестного ранее факта. Подтверждение на опыте предсказанного называют решающим экспериментом.

Если экспериментально подтверждаются предсказанные теорией новые физические закономерности или явления, то результаты опыта служат решающим доказательством правильности теории. Расхождение результатов опыта с предсказаниями теории ставит под сомнение правильность теории.

В истории становления молекулярно-кинетической теории важная роль принадлежит решающим опытам, в которых исследовались закономерности броуновского движения и распределение броуновских частиц в поле силы тяжести, выполнялись измерения скоростей движения газовых молекул и исследовалось распределение их по скоростям.

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 в 1827 г. обнаружил 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

$$\overline{\Delta x^2} = b \frac{T \cdot \Delta t}{N_A}, \quad (5.1)$$

где $\overline{\Delta x^2}$ — средний квадрат смещения броуновской частицы за время Δt , T — температура, N_A — постоянная 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. Кроме того, Перрен изучал распределение броуновских частиц в поле тяжести. В этих опытах было установлено, что распределение частиц по высоте полностью согласуется с теоретически полученной барометрической формулой. На основании результатов опытов Перрена была определена постоянная Авогадро.

Распределение молекул по скоростям. Молекулярно-кинетическая теория установила связь давления газа со средним квадратом скорости молекул. Скорости движения молекул газа по предсказаниям теории при температуре около 0 °С должны иметь значения в несколько сотен метров в секунду. Этот вывод многим казался свидетельствующим против теории, так как столь большие значения скоростей газовых молекул казались несовместимыми с фактами малой скорости диффузии газов, например при распространении запахов в воздухе.

Прямые измерения скоростей теплового движения молекул были впервые в 1920 г. выполнены немецким ученым Отто Штерном в опытах с молекулярными пучками. В качестве исследуемого газа ученый взял пары серебра. Серебро испарялось в вакууме с поверхности платиновой проволоки, нагреваемой электрическим током. На пути атомов серебра ставили экран с узкой щелью. При вращении прибора вокруг оси, совпадающей с платиновой проволокой, атомы серебра попадали на стенки цилиндра в новое место (рис. 8). По смещению полоски и известной угловой скорости вращения прибора можно

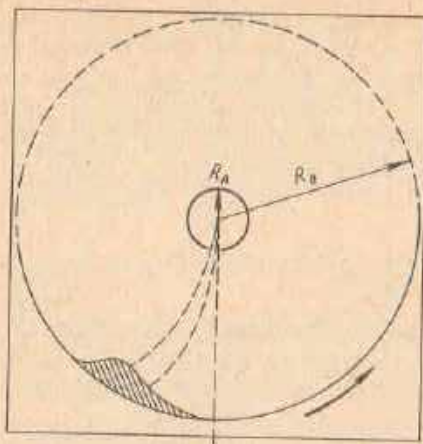


Рис. 8

ски. Атомы, движущиеся быстро, смещаются на меньшее расстояние, чем атомы, движущиеся медленно.

На рисунке 8 показано, как зависела толщина слоя серебра от места конденсации, а значит, и скорости атомов. Опыт Штерна хорошо согласовывался с распределением молекул по скоростям, вычисленным Дж. Максвеллом.

В последующие годы опыты Штерна неоднократно повторялись, видоизменялись и совершенствовались. Наиболее точные результаты были получены при исследовании изменения траек-

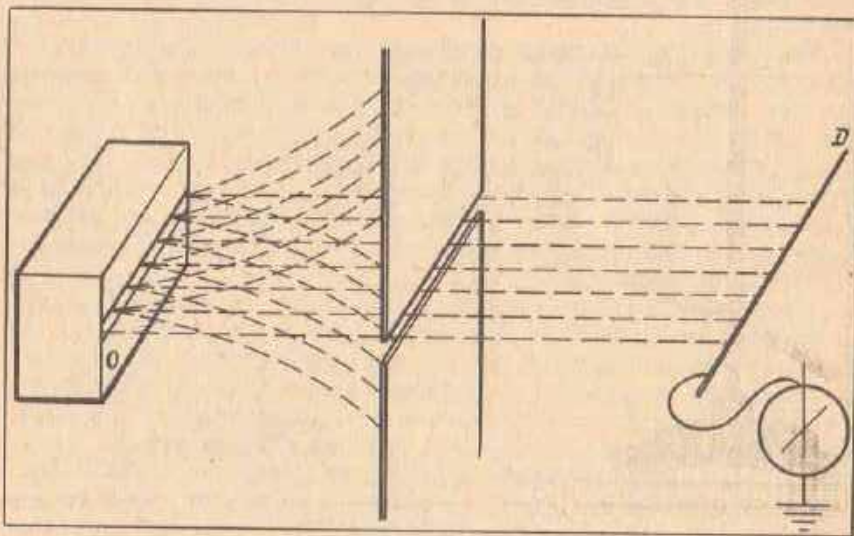


Рис. 9

торий горизонтально летящих атомов под действием силы тяжести.

В небольшом электрическом нагревателе, находящемся в вакууме, испарялись атомы цезия. Струя паров цезия выходила из отверстия O (рис. 9). С помощью щели в экране на горизонтально расположенную накалившую вольфрамовую проволоку D направлялся узкий пучок атомов цезия. Попадая на раскаленную проволоку, эти атомы ионизировались, отдавая проволоке электроны. По силе тока в цепи можно определить число атомов цезия, попадающих на проволоку за 1 с.

В отсутствие силы тяжести траектории атомов цезия были бы прямолинейны, как показано на рисунке 9. В действительности они были параболическими и тем больше отличались от прямой, чем меньше скорость атомов. Перемещая проволоку по вертикали и измеряя силу тока, определяли число атомов, обладающих соответствующими скоростями.

Результаты такого опыта представлены на рисунке 10. По оси ординат отложены значения силы тока, а по оси абсцисс — смещения проволоки вниз от положения, соответствующего попаданию

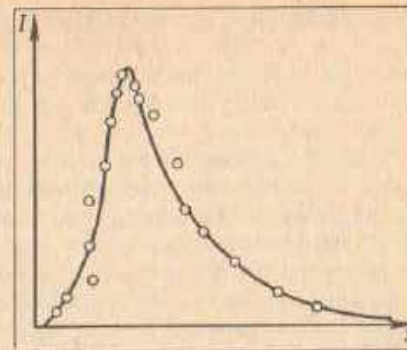


Рис. 10

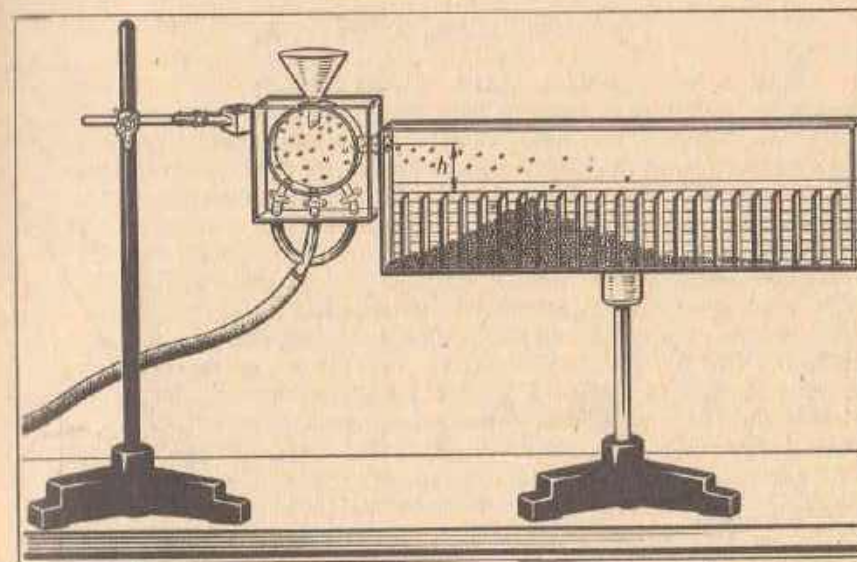


Рис. 11

горизонтально движущихся атомов цезия. Сплошная кривая на рисунке 10 рассчитана теоретически с использованием максвелловского закона распределения атомов по скоростям. Видно хорошее согласие теоретически рассчитанной кривой с данными эксперимента.

Опыт Штерна и подобные ему опыты подтвердили основные идеи Максвелла и способствовали превращению их из гипотезы в современную молекулярно-кинетическую теорию.

Изучить распределение хаотически движущихся частиц по скоростям можно на простой модели. В плоскую коробку из плексигласа помещают небольшие полиэтиленовые шарики. В коробку через три отверстия с помощью пылесоса нагнетают воздух. Под действием воздуха шарики в коробке приходят в беспорядочное движение.

В боковой стенке коробки имеется отверстие, соединяющее ее с приемной камерой, разделенной на вертикальные ячейки. Чем больше скорость шарика, влетающего в приемную камеру, тем в более далекую ячейку приемной камеры он попадает (рис. 11). Попадание шариков в разные ячейки приемной камеры показывает, что они движутся с разными скоростями.

2. Какие опыты называют решающими?

Какие следствия молекулярно-кинетической теории были подтверждены в опытах Перрена?

Каким способом можно измерить скорость движения молекул газа?

Как можно исследовать распределение молекул газа по скоростям?

§ 6. ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

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. Антуан 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. Майклу Фарадею удалось превратить в жидкость хлор путем охлаждения его при повышенном давлении. В 1877 г. французский инженер Кальете и швейцарский физик Рауль Пикте независимо друг от друга добились сжижения кислорода при повышении давления примерно до $3 \cdot 10^7$ Па и охлаждении до температуры ниже -140°C . В том же году был сжижен азот. В 1898 г. английский физик Джеймс Дьюар добился сжижения водорода, а в 1908 г. в Голландии Гейке 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 разных веществ, различны, неодинакова и потенциальная энергия их связи, отсюда различными оказываются и значения критической температуры для разных 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°C , 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°C . Такие низкие температуры не встречаются на Земле в естественных условиях, поэтому проблема сжижения этих газов оказывается тесно связанной с проблемой получения низких температур.

Особенности жидкого состояния вещества. Способность любого вещества превращаться из газа в жидкость доказывает, что между молекулами действуют не только силы отталкивания, но и силы притяжения. Особенности взаимодействия тел, между которыми одновременно действуют силы притяжения и отталкивания, можно пронаблюдать 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. 12). При большой скорости относительного движения силы отталкивания превосходят силы сцепления и мячи разлетаются после удара.

При высоких температурах скорости движения молекул велики, и, хотя силы взаим-

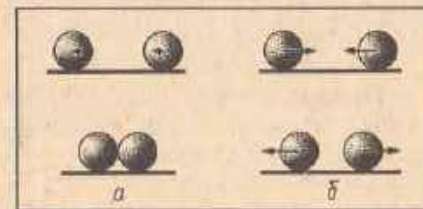


Рис. 12

ного 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.

Подобно упругим (и вместе с тем способным к соединению) мячам молекулы вещества при малых скоростях относительного движения (при низких температурах) соединяются силами молекулярного притяжения и образуют жидкость или твердое тело.

Молекулы в жидкости или в твердом теле находятся друг от друга на таких расстояниях, на которых силы их взаимного притяжения оказываются в точности равны силам отталкивания, т. е. молекулы располагаются упорядоченно, на равных расстояниях друг от друга. Однако в жидкости упорядоченное движение молекул сохраняется лишь среди ближайших соседей, т. е. на расстояниях порядка нескольких молекулярных диаметров. Молекулы жидкости, совершая тепловые колебания около положений равновесия, при столкновениях друг с другом могут приобрести энергию, достаточную для того, чтобы «перекочевать» в новое положение равновесия. В результате этого ближний порядок постоянно разрушается тепловым движением и вновь создается силами межмолекулярного взаимодействия.

Существование ближнего порядка в расположении молекул жидкости и возможность сравнительно свободного перемещения молекул друг относительно друга обуславливают особые свойства жидкостей. Молекулы вещества в жидком состоянии расположены вплотную друг к другу, как и в твердом состоянии. Поэтому объем жидкости мало зависит от давления. Постоянство занимаемого объема является свойством, общим для жидких и твердых тел и отличающим их от газов, способных занимать любой предоставленный объем.

Возможность свободного перемещения молекул относительно друг друга обуславливает свойство текучести жидкости. Тело в жидком состоянии, как и в газообразном, не имеет постоянной формы. Форма каждого жидкого тела определяется формой сосуда, в котором находится жидкость, действием внешних сил и сил поверхностного натяжения. Большая свобода движения молекул в жидкости приводит к большей скорости диффузии в жидкостях, чем в твердых телах, обеспечивает возможность растворения твердых веществ в жидкостях.

Твердое тело. Из газообразного и жидкого состояний любое вещество может превратиться в твердое состояние. Твердое тело отличается от жидкости тем, что при тепловых колебаниях около положений равновесия атомы и молекулы длительное время не могут изменить своего положения среди других атомов. Это приводит к возможности установления дальнего порядка в располо-

жении атомов, т. е. строгой периодичности в расположении атомов на расстояниях в тысячи межатомных расстояний.

Из-за неравномерного распределения энергии теплового движения переходы атомов или молекул в кристалле с одного места на другое все же возможны, но случаются крайне редко. Среднее время их «оседлой жизни» исчисляется сутками и годами. Поэтому диффузия в кристаллах протекает очень медленно.

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. 13). 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 парообразования 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 рис. 13 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.

Кривая CA на диаграмме состояний веществ отмечает сочетания 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 называют сублимацией.

Конечно, сублимации сопут-

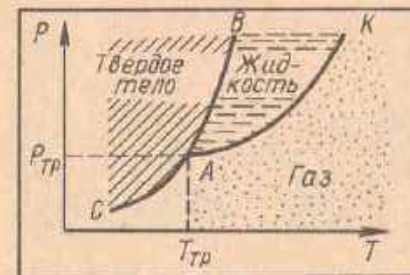


Рис. 13

ствуется 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 (см. кривую сублимации СА).

Тройная точка. Кривые плавления и парообразования пересекаются в точке А. Эту точку называют *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_H . Те же вещества, у которых давление $p_{тр}$ превышает p_H , в результате нагревания при давлении p_H не плавятся, а переходят в газообразное состояние.

Например, при давлении p_H 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_H .

Образование облаков. В летний день земная поверхность, поглощающая большую часть падающего на нее солнечного излу-

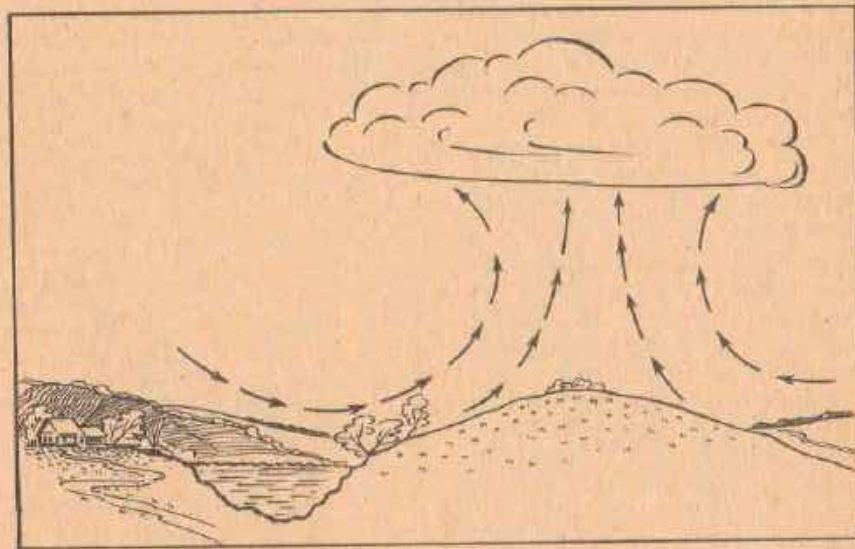


Рис. 14

чения, 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 к тому, что он «всплывает» вверх, а его место занимает более плотный и холодный воздух из соседних участков (рис. 14).

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 тепловых движений 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 $1^\circ C$ (рис. 15). 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 водя-

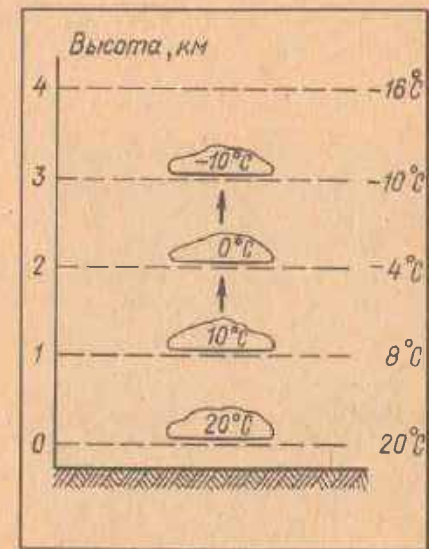


Рис. 15

ной пар из ненасыщенного становится пересыщенным, происходит конденсация пара и возникает облако, состоящее из мелких водяных капель. Высота нижней границы 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.

?

Каковы особенности жидкого состояния вещества?

Что такое «ближний порядок» в расположении молекул?

Чем объясняется свойство текучести жидкости?

Что такое «дальний порядок»?

Почему твердые тела сохраняют свою форму?

Может ли вещество переходить из газообразного состояния в твердое, минуя фазу жидкого состояния?

Может ли твердое тело превратиться в газ без плавления?

Что такое тройная точка?

Как образуются облака?

Почему облака не падают на Землю?

§ 7. СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Кристаллические тела. Кристаллическими называют твердые тела, в которых атомы или молекулы расположены в пространстве упорядоченно. Физические свойства кристаллов неодинаковы в различных направлениях, но совпадают в параллельных направлениях. Именно анизотропия физических свойств, а не геометрически правильная форма является важнейшим признаком кристаллического тела.

Простейший пример анизотропии кристаллов — неодинаковая их прочность по различным направлениям. Это свойство наглядно проявляется при дроблении многих кристаллических тел. Результаты опыта по раскалыванию кристаллического тела представлены на фотографиях 1—2.

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 кристаллическую природу каменной соли.

Замечательное свойство многих кристаллов давать при дроблении осколки, подобные



Фото 1. Кристалл каменной соли округлой формы

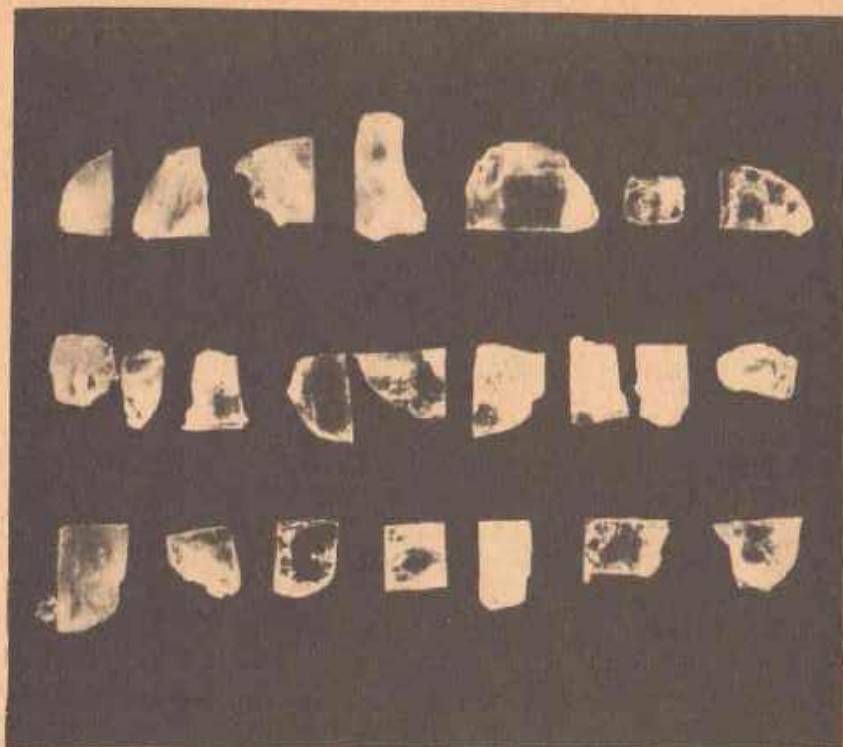


Фото 2. Осколки, получившиеся после разрушения кристалла каменной соли

друг другу по форме, позволило французскому ученому Рене Гаю и 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 Гаю 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 в 1748 г. пришел 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. 16, 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. 16, б).

Укладка третьего слоя шаров может быть осуществлена двумя способами. 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 структурой* (рис. 16, 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. 16, 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 распро-

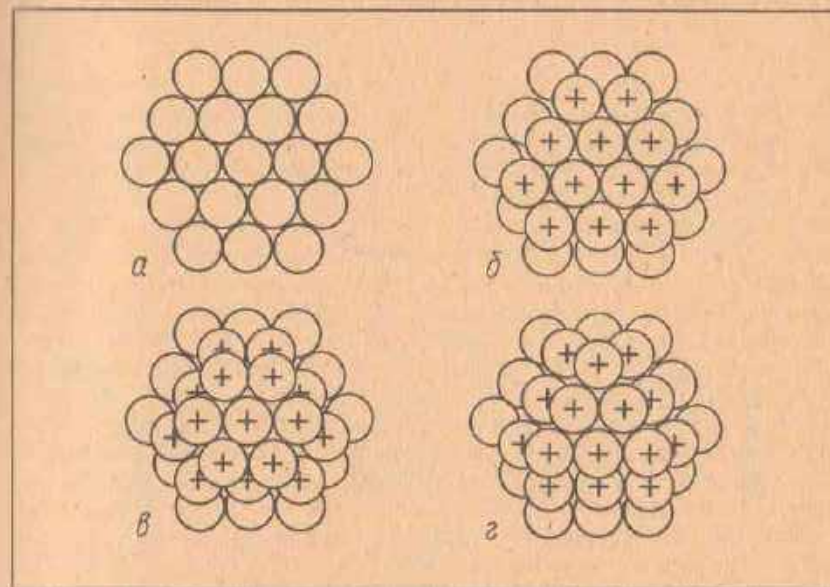


Рис. 16

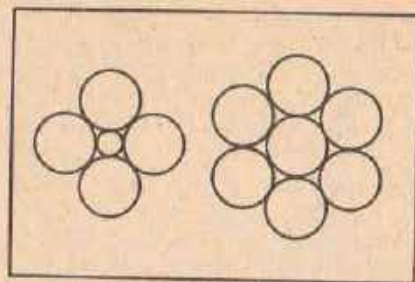


Рис. 17. Зависимость способа плотной упаковки от размеров шаров, укладываемых в один слой на плоскости

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. 17).

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 применяют 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 кристалла каменной соли — хлорида натрия, представленную на рисунке 18. От ионов, находящихся на 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 $1 + 12 \cdot \frac{1}{4} = 4$. Ионов натрия в элементарной ячейке шесть половинок на гранях и восемь «восьмушек» в вершинах. Всего ионов хлора в одной ячейке $6 \cdot \frac{1}{2} + 8 \cdot \frac{1}{8} = 4$.

странены. 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

Сравнение элементарных ячеек кристаллических решеток различного типа может проводиться по разным параметрам, среди которых часто употребляют атомный радиус, плотность упаковки и количество атомов в элементарной ячейке. *Атомный радиус определяют как половину расстояния между центрами ближайших соседних атомов в кристалле. Долю объема, занятую атомами в элементарной ячейке, называют плотностью упаковки.* На рисунке 19 представлены объемные изображения элементарных ячеек четырех типов.

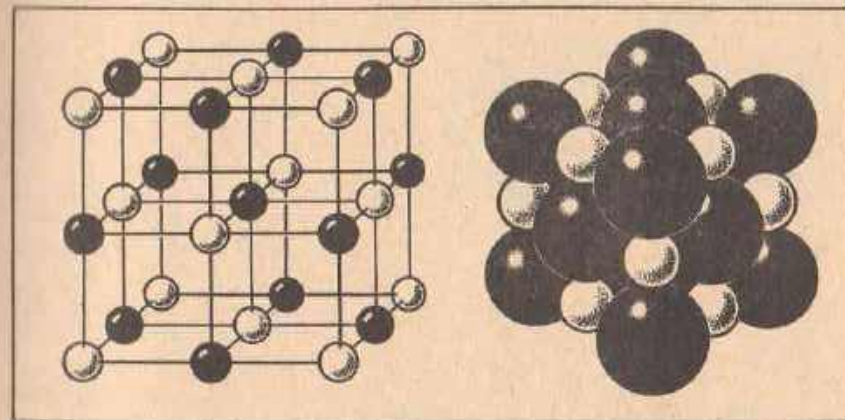


Рис. 18

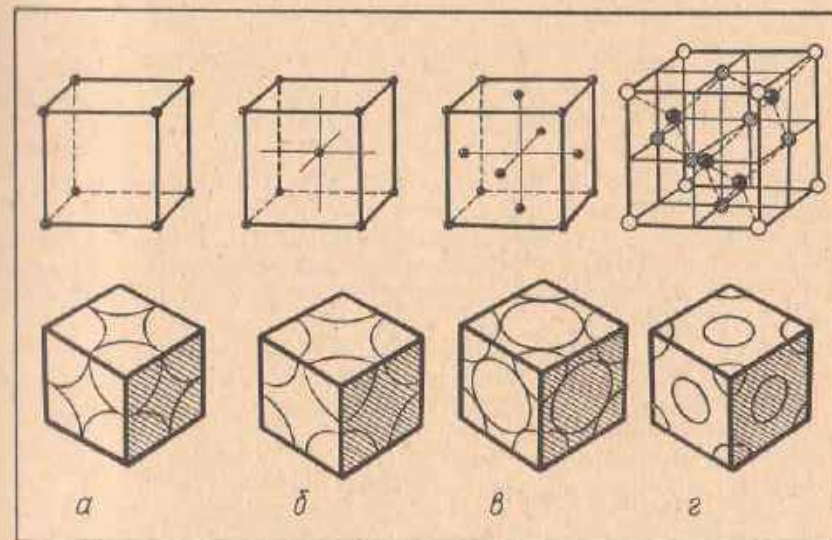


Рис. 19



Е. С. Федоров

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.*

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 Евграф Степанович 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 шестиугольник.

- По какому принципу осуществляется укладка атомов и молекул в кристаллах?
 Что называют пространственной решеткой кристалла?
 Что такое элементарная ячейка?
 Что такое атомный радиус?
 Что называют плотностью упаковки?

§8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ

Представления о периодической структуре кристаллов и симметрии расположения атомов в них в настоящее время имеют строгое экспериментальное подтверждение. Данные о взаимном расположении атомов в кристаллах и расстояниях между ними получают из опытов, в которых через кристаллы пропускают пучки электронов, нейтронов, рентгеновские лучи и наблюдают их отражение.

Рентгеноструктурный анализ. Первые сведения о внутренней структуре кристаллов были получены с помощью рентгеновских лучей. Рентгеновские лучи представляют собой электромагнитные волны, подобные световым и радиоволнам, но с гораздо большей частотой. Известно, что рентгеновские лучи используют для изучения состояния внутренних органов человека. При обследовании человека рентгеновское излучение направляют на исследуемую область, а за человеком устанавливают экран, способный светиться под действием этого излучения. Если на пути рентгеновских лучей находятся органы человека с малой плотностью, например легкие, излучение мало поглощается и вызывает яркое свечение экрана. Органы с большей плотностью (сердце, кости скелета) поглощают значительную часть рентгеновского излучения, поэтому против них на экране видны темные тени.

Для исследования внутренней структуры кристаллов рентгеновские лучи используют иначе. На фотоснимке, полученном при просвечивании кристалла, тоже можно увидеть темные пятна на светлом фоне, но это вовсе не тени от атомов или молекул.

Рентгеновские лучи, как и любые другие волны, при встрече с препятствием частично отражаются. Каждый атом кристалла, которого достигает электромагнитная волна рентгеновского излучения, частично отражает падающую волну, как это схематично изображено на рисунке 20.

Английские ученые И. Г. Брегг и В. Л. Брегг и профессор Московского университета Ю. В. Вульф обнаружили, что отражение рентгеновских лучей происходит наиболее эффективно при выполнении условия:

$$2d \sin \varphi = n\lambda, \quad (8.1)$$

где d — постоянная кристаллической решетки, φ — угол скольжения, составляемый атомной плоскостью и падающим лучом,

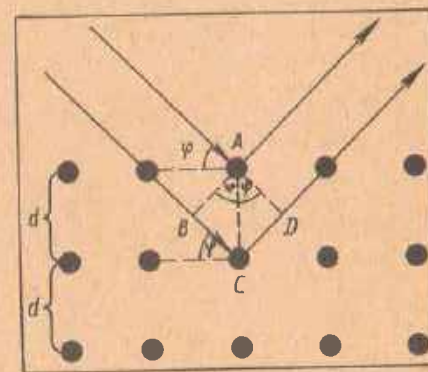
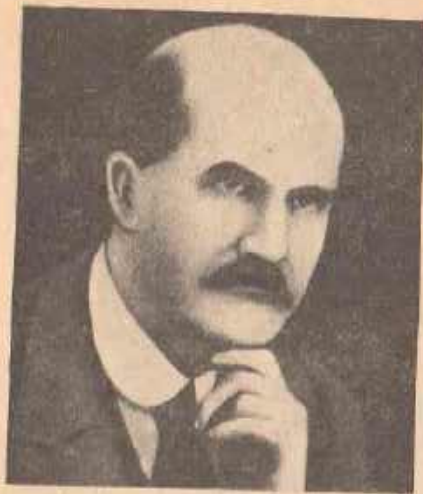


Рис. 20



В. Г. Брегг



В. Л. Брегг

λ — длина волны рентгеновского излучения, n — принимает значения 1, 2, 3, ...

Это условие можно объяснить следующим образом. Пути рентгеновских лучей, отражающихся от двух соседних атомных плоскостей, отличаются на длину отрезка $BC + CD$ (рис. 20). Как видно из этого рисунка, длина каждого из этих двух отрезков равна $d \sin \varphi$, где d — расстояние между атомными плоскостями. При выполнении условия (8.1) пути лучей, отраженных от первой, второй, третьей и т. д. атомных плоскостей кристалла, отличаются на целое число длин волн; «горбы» волн совпадают с «горбами», а «впадины» — со «впадинами», поэтому результат их сложения оказывается максимальным.

Если, например, направить рентгеновский луч на поликристалл,

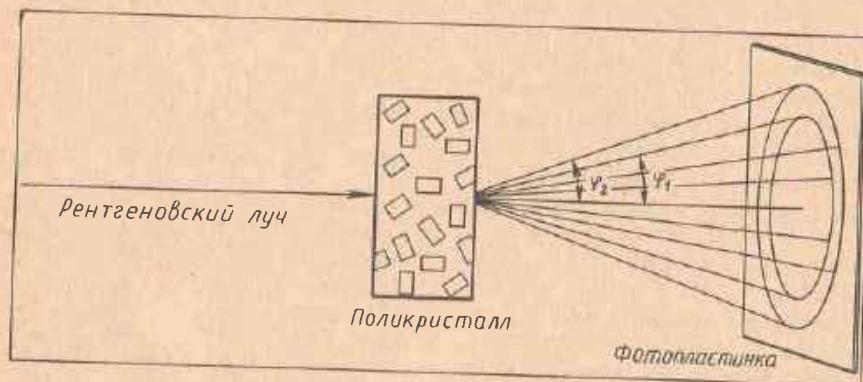


Рис. 21

то максимум отражения будет наблюдаться под углом φ_1 относительно первичного направления луча, удовлетворяющим выражению (8.1) при значении $n = 1$ (среди множества маленьких монокристаллов найдутся такие, атомные плоскости которых ориентированы под углом φ_1 к лучу). За образцом будет распространяться конус отраженных лучей. Под действием этих лучей на фотопластинке после проявления образуется темная окружность. Другие окружности будут образованы лучами, отраженными от кристаллов, атомные плоскости которых составляют с падающим лучом угол φ_2 при значении $n = 2$ и т. д. (рис. 21).

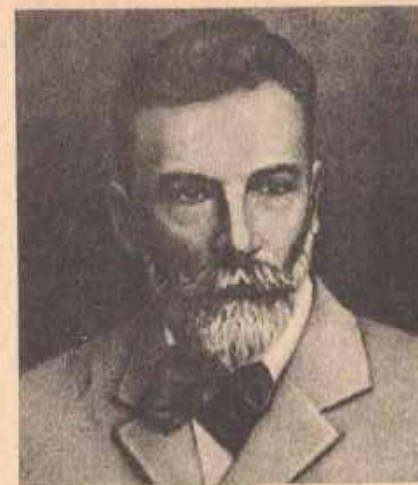
Измерив угол φ_1 и зная длину волны λ рентгеновского излучения, можно вычислить постоянную решетки d , т. е. расстояние между слоями атомов. Такова в общих чертах суть одного из методов рентгеноструктурного анализа, предложенного немецким физиком Петером Дебаем.

Рентгеноструктурный анализ доказал реальность существования всех кристаллических структур, теоретически рассчитанных Е. С. Федоровым.

Каналирование частиц в кристаллах. Быстро движущиеся ионы атомов могут проходить через монокристалл, состоящий из многих тысяч слоев атомов, так как электроны атомов из-за малой массы не являются существенным препятствием для быстро движущихся массивных ионов. Главным препятствием для ионов в кристалле являются ядра атомов, расположенные в узлах решетки и занимающие ничтожный по сравнению с атомом объем, но имеющие большую массу.

Экспериментальные исследования показали, что толщина монокристалла, через который могут пролететь быстрые положительные ионы, зависит от ориентации атомных плоскостей кристаллической решетки относительно направления движения ионов. На рисунке 22, например, показана зависимость интенсивности пучка протонов, прошедшего сквозь монокристалл золота при постоянной толщине, от угла поворота его атомных плоскостей относительно вектора скорости частиц.

Для объяснения эффекта различной прозрачности кристалла по разным направлениям можно выполнить опыт с моделью кристалла. Если вращать модель кристалла хлорида натрия,



Ю. В. Вульф

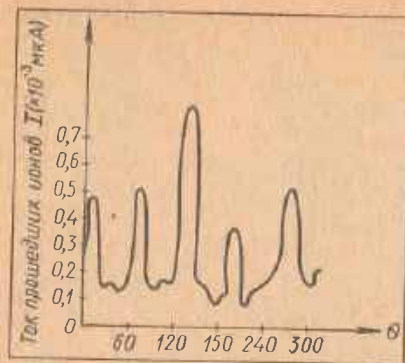


Рис. 22

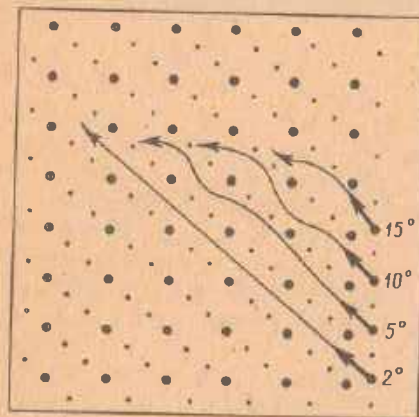


Рис. 23

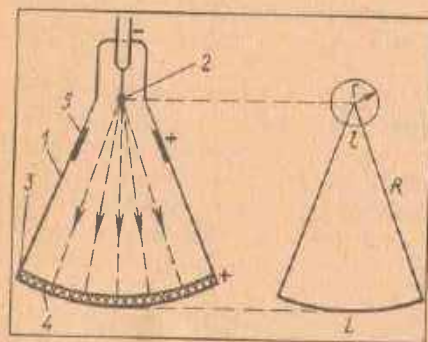


Рис. 24

сделанную из пластмассовых шариков, соединенных стальными стержнями, и рассматривать на просвет, то при одних ее положениях в просветы (каналы между шарами) за моделью кристалла можно наблюдать предметы, а при других ее положениях сквозь модель почти ничего нельзя увидеть (все закрывают шары).

Как шары в модели кристалла мешают прохождению света при определенном расположении модели решетки, так и ядра атомов в монокристалле могут мешать движению ионов при определенном расположении кристалла. Если же монокристалл расположить так, что вектор скорости ионов направлен вдоль свободного канала между атомными ядрами кристаллической решетки или под малым углом к оси канала, то ионы смогут проникать в кристалл на большую глубину (рис. 23). Этот эффект называют **каналированием**. С его помощью можно экспериментально исследовать расположение атомных слоев.

Протонография (метод теней). Исследуя взаимодействие быстрых протонов с кристаллами, профессор МГУ А. Ф. Тулинов в 1964 г. обнаружил, что если рядом с кристаллами, облучаемыми ионами, поместить со стороны пучка фотопластинку, то отраженные, рассеянные назад ионы создают на фотопластинке изображение. Более темные участки — «тени» — соответствуют пониженной интенсивности рассеянных протонов, т. е. месторасположениям каналов, в которые уходят

ионы. По фотографии «теней» можно определить расположение атомных плоскостей в кристалле, регистрировать дефекты кристалла.

Этот новый метод исследования структуры кристаллов, являющийся развитием метода **каналирования**, получил название **протонографии**. Работы А. Ф. Тулинова и возглавляемого им коллектива в 1972 г. удостоены Государственной премии СССР.

Электронный проектор. Наглядную картину строения кристалла можно получить с помощью электронного или ионного проектора.

По внешнему виду и конструкции электронный проектор напоминает кинескоп телевизора (рис. 24). В стеклянной колбе 1 со сферическим дном радиуса R создается высокий вакуум ($10^{-7} - 10^{-9}$ Па). Исследуемый кристалл металла в виде тончайшей иглы 2 с радиусом закругления острия $r \approx 0,3 - 0,5$ мкм располагается перед люминесцирующим экраном 3, нанесенным на прозрачный слой платины 4. При разности потенциалов между острием — катодом 2 — и слоем платины — анодом 4 — в несколько киловольт у поверхности острия создается напряженность электрического поля $10^9 - 10^{10}$ В/м, достаточная для отрыва электронов от атомов на поверхности острия. Это явление называют **автоэлектронной** или **холодной эмиссией электронов**.

Вырванные с поверхности острия электроны ускоряются и устремляются радиальными пучками к аноду. Попадая на люминесцирующий экран, они вызывают его свечение, создавая увеличенное изображение поверхности катода, отражающее симметрию его кристаллического строения. Увеличение электронного проектора определяется соотношением

$$\frac{L}{l} = \frac{R}{r},$$

где l — расстояние между двумя точками на поверхности острия, L — расстояние между изображениями этих точек на экране.

При радиусе закругления острия $r = (0,25 - 0,5)$ мкм и радиусе кривизны $R = 5$ см получается увеличение в $(1 - 2) \cdot 10^5$ раз.

С самыми тонкими остриями удается достигнуть увеличения в $10^5 - 10^6$ раз. Это позволяет на люминесцирующем экране наблюдать не только контуры крупных молекул на поверхности катода, но и получать представления о структуре самих молекул.

Ионный проектор. Ионный проектор конструктивно отличается от электронного **полярностью** приложенного напряжения, большей напряженностью поля у острия-катода и тем, что колба заполняется водородом или гелием при давлении 0,1 Па.

В сильном электрическом поле положительно заряженной иглы атомы гелия поляризуются и притягиваются к острию. У поверхности острия с них срывается по одному электрону и они становятся положительными ионами. Чаше всего ионизация атомов гелия происходит около выступающих участков поверхности острия,

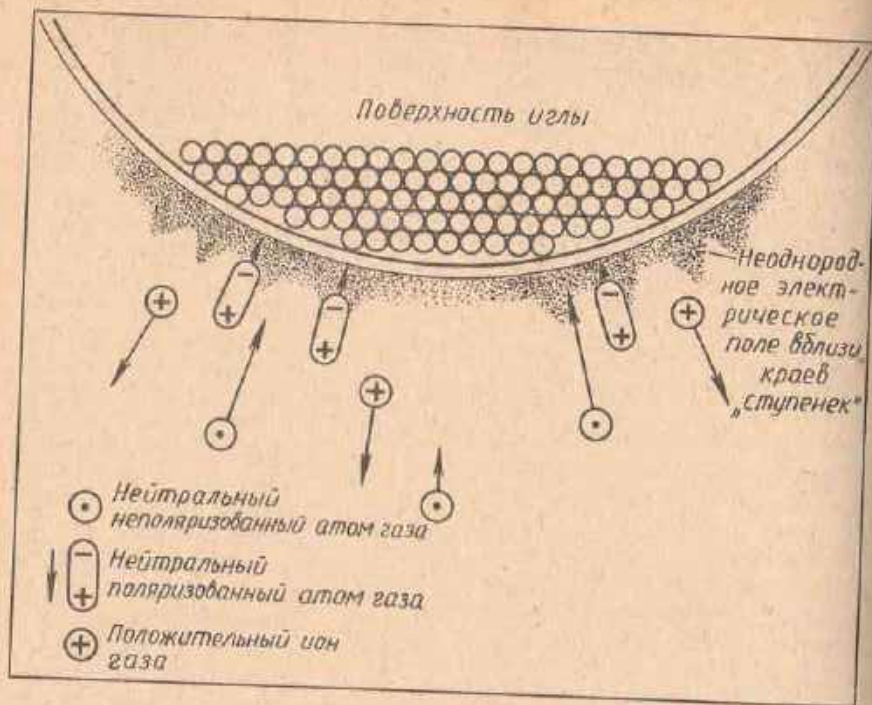


Рис. 25

вблизи атомов у краев «ступенек» кристаллической решетки, где напряженность электрического поля максимальна (рис. 25).

Образовавшиеся положительные ионы движутся прямолинейно к отрицательно заряженному экрану. Соударяясь с экраном, они вызывают его свечение, создавая увеличенное в $(5-10) \cdot 10^6$ раз изображение поверхности острия. Пунктир из светлых точек на фото 3 — это края ступенек кристалла, каждая светлая точка соответствует местоположению атома в кристаллической решетке.

Большое увеличение ионного проектора получается за счет того, что под действием сильного электрического поля, приходящегося на кончик острия, атомы металла как бы «стекают» с него, образуя сверхтонкую «нить» диаметром всего в несколько десятков атомов.

Среди атомов газа, совершающих хаотическое тепловое движение, в колбе имеются атомы, обладающие столь высокими скоростями, что после соударения с иглой и ионизации отскакивают от нее, существенно отклоняясь от направления, задаваемого электрическим полем. Вызываемое такими атомами свечение экрана искажает картину расположения атомов острия.

Для устранения этого нежелательного эффекта и повышения разрешающей способности ионного проектора стенки колбы и

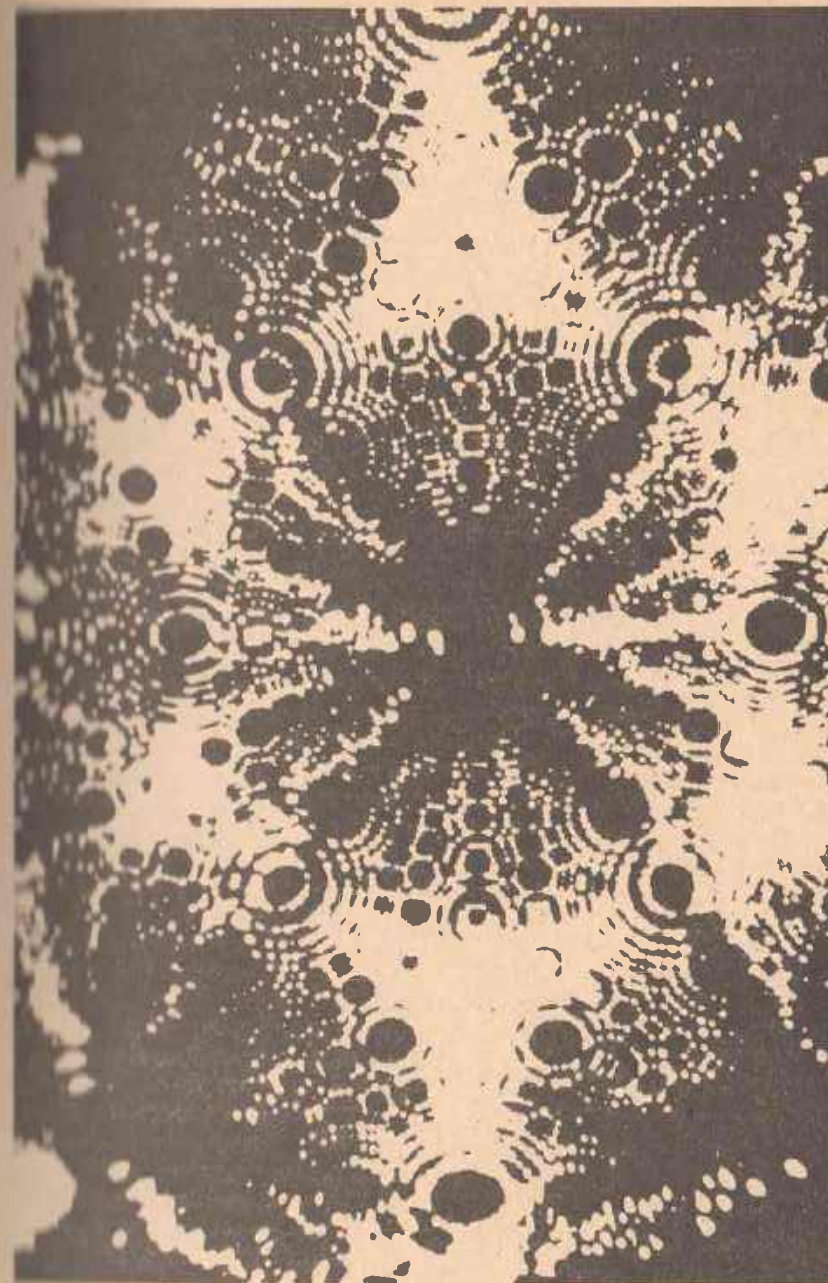


Фото 3 Структура кристалла вольфрама, полученная с помощью ионного микропроектора

сама игла охлаждаются жидким водородом. При этом скорость атомов газа резко уменьшается, а изображение на экране становится более четким и резким.

2. Каким образом используют рентгеновские лучи для исследования строения кристаллов?

В чем заключается эффект каналирования частиц в кристаллах?

Как устроен электронный проектор?

Чем ионный проектор отличается от электронного?

§ 9. ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Механизм роста кристаллов. Долгое время считалось очевидным, что при росте кристалл строится 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. 26). 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 завершенной 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.

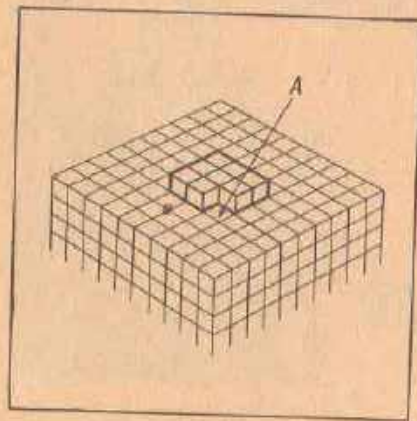


Рис. 26

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!

Дефекты в кристаллах. Объяснение расхождению теории и практики было найдено лишь сравнительно недавно. Легкость, с которой начинается застройка новой атомной плоскости, можно объяснить тем, что

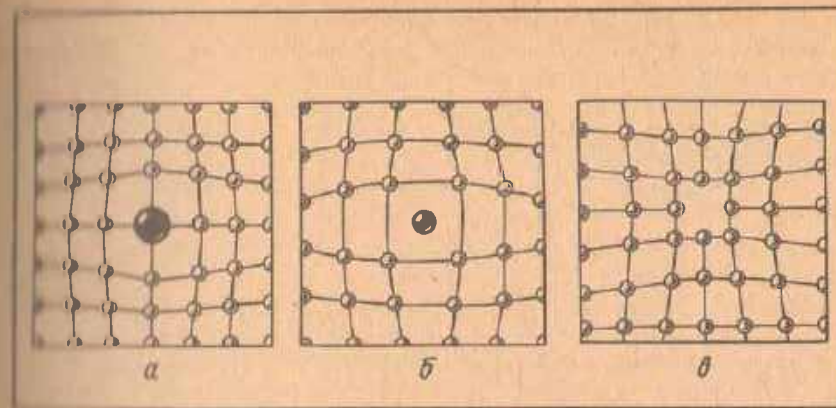


Рис. 27

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 27. 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* (сдвигами).

Простейшими видами дислокаций являются *краевая* и *винтовая*. *Краевая дислокация* образуется в месте сдвига «лишней» атомной плоскости (рис. 28). В случае *винтовой дислокации* атомные плоскости образуют систему, напоминающую винтовую лестницу. Количество дислокаций в кристаллах может быть очень большим, достигая 10^8 — 10^9 см⁻². Кристаллов без дислокаций не существует. Постоянное наличие открытой сту-

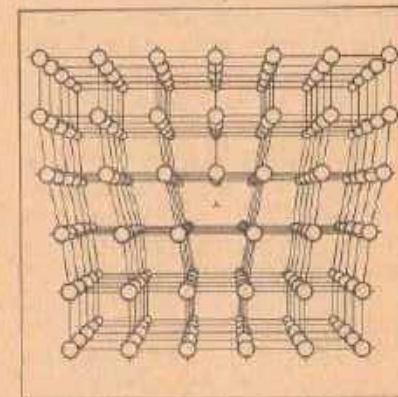


Рис. 28

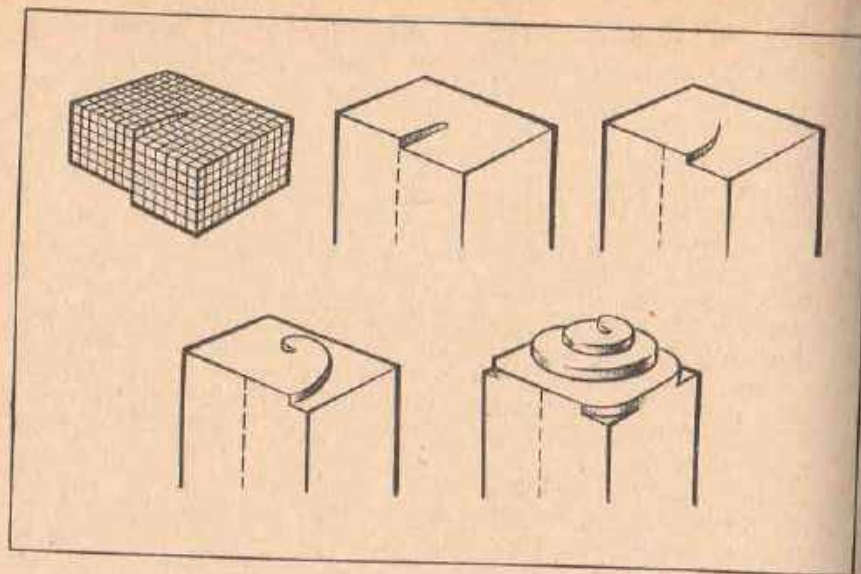


Рис. 29

пенки 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. 29). Центральная часть ее как бы ввинчивается в пространство, опережая в своем движении нижние ступеньки лестницы, которые со временем будут застроены полностью и исчезнут, превратившись в завершенный 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 пластинок, 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 сил

и частиц, образующих кристалл. Вероятность прилипания молекул в направлении действия больших сил, конечно, оказывается большей, чем в направлении действия меньших сил. Так обстоит дело и в кристаллах с пластинчатой структурой (слюда, графит), в которых рост происходит преимущественно вдоль плоскостей, 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 перепадах температуры пара или раствора, то часто образуются необычные для данного вещества ветвистые, древовидные формы, называемые *дендритами*. Объясняется это тем, что вершины кристаллов соприкасаются с более пересыщенным паром или раствором, чем их грани. Опережая в росте боковые грани, вершины внедряются в глубину неиспользованного раствора или пара, что способствует их дальнейшему быстрому росту и т. д.

Примером дендритных образований являются снежинки, ледяные узоры на стекле. 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 в виде дендритов встречаются серебро, медь, золото.

Получение монокристаллов. Монокристаллы ряда элементов и многих химических веществ обладают замечательными механическими, электрическими, магнитными и оптическими свойствами. 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 люди многие кристаллы на протяжении тысячелетий 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

лы 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 оксида 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, применяют, например, следующий способ. Тигель с расплавом медленно опускают сквозь отверстие в вертикальной трубчатой печи. Кристалл

зарождается на дне тигля, раньше попадающем в область более низких температур. Затем кристалл постепенно разрастается по всему объему расплава. Дно тигля специально делают узким, заостренным на конус, чтобы в нем мог расположиться только один кристаллический зародыш (рис. 30).

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

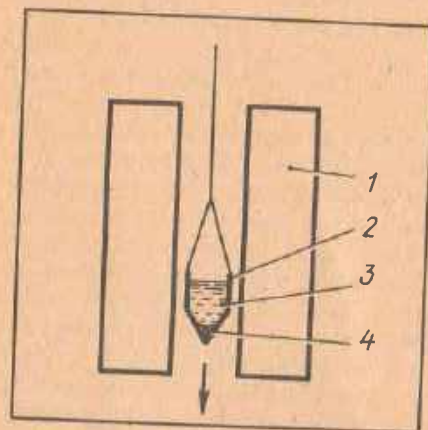


Рис. 30. Схема установки для выращивания кристаллов из расплава методом последовательного охлаждения: 1 — нагреватель, 2 — тигель, 3 — расплав, 4 — растущий кристалл

Недостаток описанного метода — загрязнение кристаллов частицами тигля. Избежать этого недостатка можно при тигельном способе выращивания кристаллов из расплава, которым выращивают, например, корунд, рубины, сапфиры. Тончайший порошок оксида алюминия из зерен размером 100 мкм высыпается тонкой струей из бункера, проходит через кислородно-водородное пламя, плавится и в виде капель попадает на стержень из тугоплавкого материала. Температура стержня поддерживается несколько ниже температуры плавления оксида алюминия (1010 °C). Капли оксида 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. 31).

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 используют 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 кристалл раствора оказывается менее пересыщенным, чем удален от него. Так как плотность пересыщенного раствора либо больше, либо меньше насыщенного, то над поверхностью растущего кристалла всегда имеется направленный либо вверх, либо вниз поток «неиспользованного» 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.

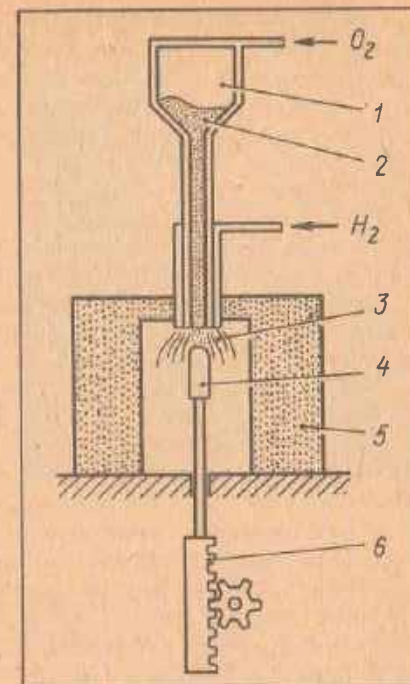


Рис. 31. Схема установки для выращивания кристаллов рубина:

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

Чем меньше скорость роста, тем лучше 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°C и давлении 10^8 Па.

Применение 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 используют 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 резцов 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, оксид алюминия (Al_2O_3) с красящей примесью оксида 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 — практически вечны.

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 расходуется 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 — в наличии 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, погруженными 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 $150 \cdot 10^7$ Па.

Внутренние дефекты кристаллов также влияют на механические свойства твердых тел. При наличии дислокаций для осуществления пластической деформации нет необходимости в одновременном разрыве всех связей между двумя плоскостями. Достаточно разорвать небольшое число связей и переместить дислокацию на расстояние порядка постоянной решетки, как это показано на рисунке 32. 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.



А. Ф. Иоффе

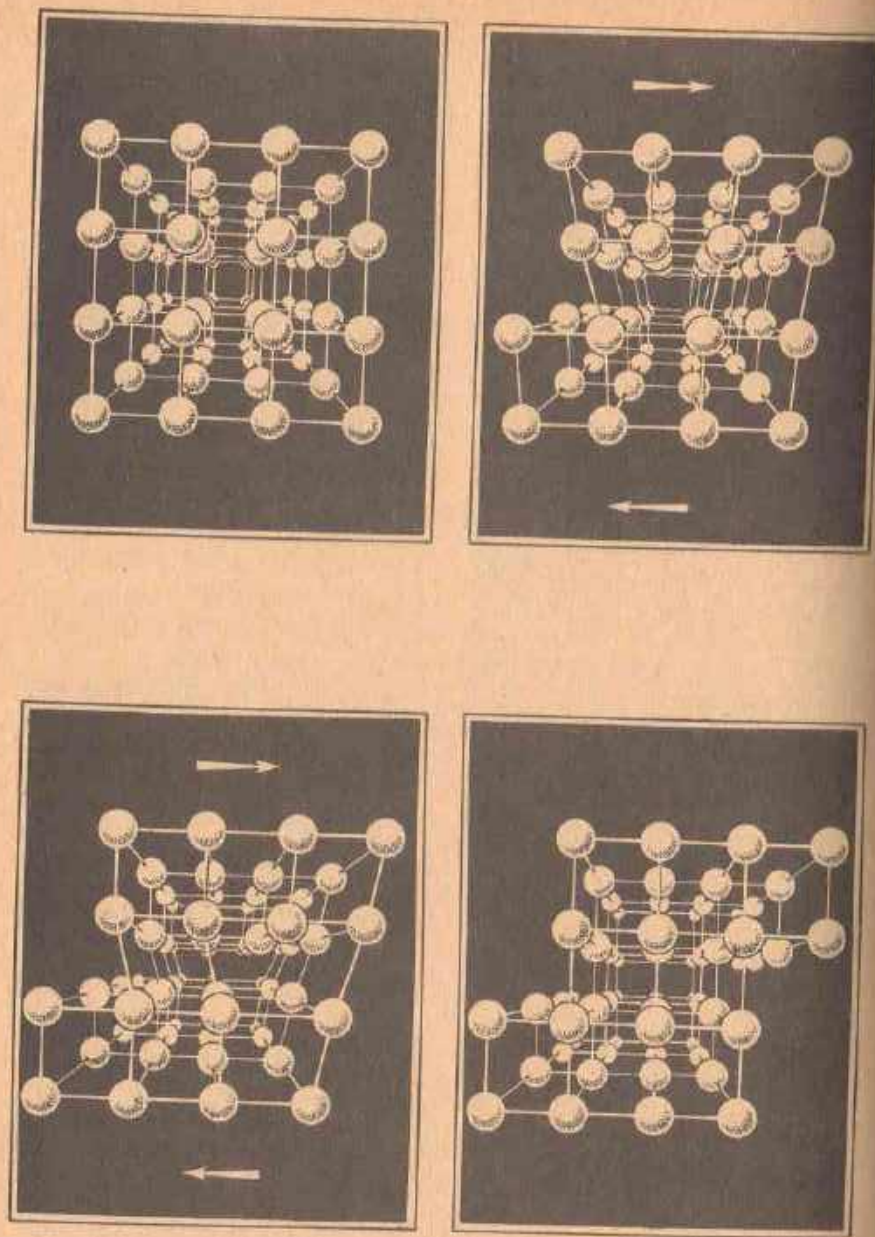


Рис. 32

При этом перемещению дислокации может служить другая дислокация, встретившаяся 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. 33).

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

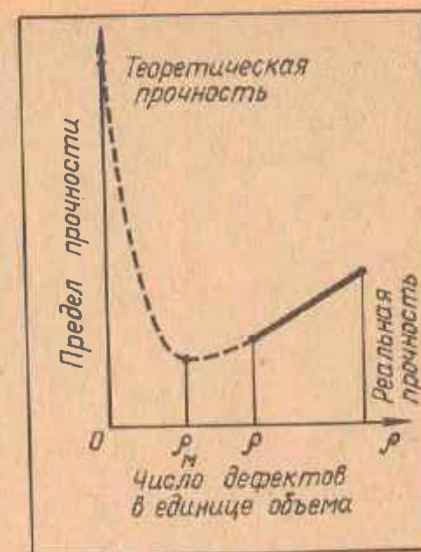


Рис. 33

Таблица 1

Теоретическое значение прочности некоторых материалов и прочность их монокристаллов в виде „усов“

Материал	Оксид алюминия (сапфир)	Железо	Медь
Теоретическая прочность, Па	$3 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^{10}$
Прочность „усов“, Па	$2,8 \cdot 10^{10}$	$1,3 \cdot 10^{10}$	$0,4 \cdot 10^{10}$

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 способе, состоящем в искажении кристаллической структуры путем создания в ней различного рода дефектов — введением примесей, созданием дислокаций. Например, при легировании стали — введением 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.

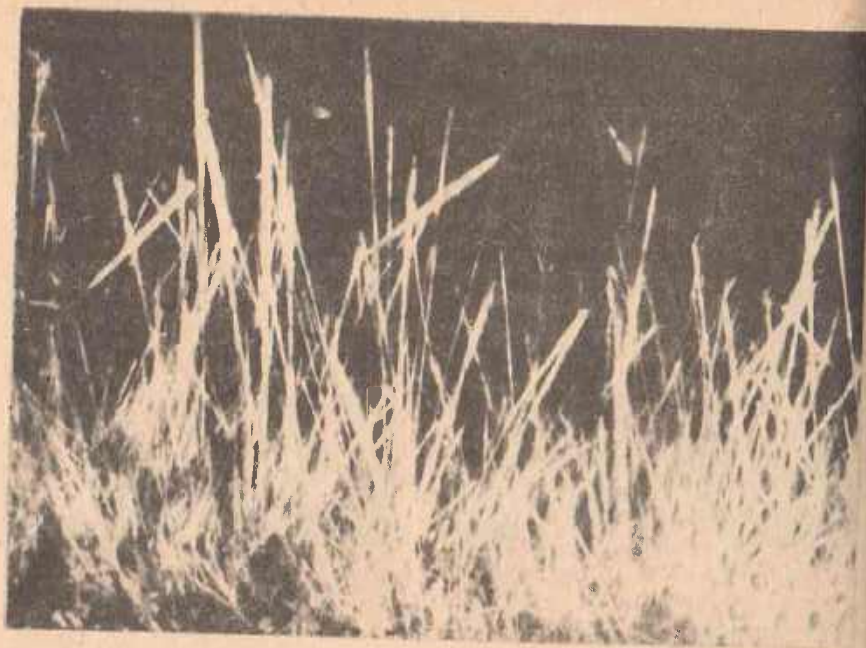


Фото 4. Кристаллы сапфира

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.

Использование научных достижений в металлургии позволило получать алюминиевые сплавы, не уступающие по прочности легированным сталям. Лучшие марки стали в 30-х годах нашего столетия обладали прочностью на разрыв 10^9 Па, а современные — до $2,3 \cdot 10^9$ Па.

Традиционный способ повышения жаропрочности за счет увеличения содержания легирующих элементов исчерпал себя, так как приводит к резкому снижению пластичности, а это снижает надежность деталей и затрудняет их механическую обработку.

Приблизить практическую прочность металлов к теоретической можно и другим способом — высокоскоростной кристаллизацией. Чем быстрее отводится тепло от затвердевшего слитка, т. е. чем больше скорость кристаллизации, тем меньше размеры кристаллов и тем тоньше межзеренные прослойки. Такая структура обладает лучшими физическими и механическими характеристиками. Но крупные слитки металла невозможно охладить быстро. Сверхскоростное охлаждение до 10^4 К в секунду осуществляется в «слитках» размером 5 — 500 мкм. Для этого расплавленный металл струей нейтрального газа с помощью форсунки распыляет-

ся в мельчайшую пыль. В таких условиях гранулы затвердевают в ничтожные доли секунды. Затем гранулы спрессовывают при давлении $2 \cdot 10^8$ Па (2000 атм) и температуре 1200°C .

На основе высокоскоростной кристаллизации и последующего горячего прессования разработана технология производства, например, дисков из никелевых сплавов для газотурбинных двигателей. Таким способом жаропрочность дисков была повышена более чем в полтора раза. Это дало возможность уменьшить массу агрегатов, повысить рабочие температуры, увеличить срок службы двигателей.

Кристаллизация в невесомости. Одной из актуальных задач в настоящее время является создание материалов, в которых в виде каркасов использовались бы нитевидные кристаллы графита, сапфира, «усы» из карбида кремния. Но в земных условиях не удается вырастить длинные нити, так как под действием силы тяжести они изгибаются, ломаются, под действием силы тяжести в них появляются деформации, возникают дислокации, ухудшающие многие свойства. Самые длинные нити достигают нескольких миллиметров. В космосе же нет ограничений для выращивания кристаллических нитей любой длины и значительных размеров. Начало космической технологии было положено в 1969 г. экспериментом на космическом корабле «Союз-6». Монокристаллы индия, выросшие в невесомости, оказались изогнутыми потому, что длина их превысила расчетные пределы и нити «уперлись» в стенку ампулы, где они росли. Кристаллы, выращенные в невесомости, имеют примерно в 100 раз меньше дислокаций, чем выращенные на Земле.

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 — *арagonита*.

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 — *вирусы* — 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 изменении внешних условий на благоприятные (такими для вирусов являются условия внутри клеток живого организма) они начинают двигаться, размножаться.

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



Фото 5. Изображение вируса, полученное на электронном микроскопе

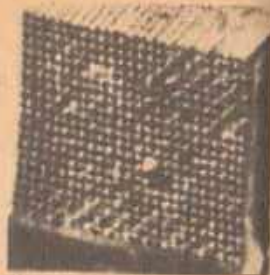


Фото 6. Изображение большого кристалла белка

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 самым 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 *дезоксирибонуклеиновой кислоты*, называемой кратко **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 — *одномерные аperiодические кристаллы*. Следовательно, кристаллы — это не только символ неживой природы, но и основа жизни на Земле.

- ?
- Какие дефекты встречаются в структуре кристалла?
 - Что такое дислокация?
 - Как выращивают монокристаллы?
 - Какими способами повышают прочность твердых тел?
 - Какова роль кристаллов в живых организмах?

§ 10. ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Большинство веществ может находиться в трех состояниях — твердом, жидком и газообразном. Однако некоторые органические вещества, молекулы которых имеют нитевидную форму или форму плоских пластин, могут находиться в особом состоянии, обладая одновременно свойством анизотропии и текучести. Это состояние, сочетающее свойства кристалла и жидкости, называют *жидкокристаллическим состоянием*. В среднем на каждые 200 сложных органических соединений приходится одно, способное к образованию жидких кристаллов.

Строение жидких кристаллов. В зависимости от внутреннего строения жидкие кристаллы разделяют на три класса: нематический, смектический, холестерический.

Наиболее простая их разновидность — *нематики* (от греч. «немия» — нить) образуется длинными нитевидными сигарообразными молекулами. В жидкокристаллическом состоянии «сигары» взаимно параллельны, но беспорядочно сдвинуты вдоль своих осей (рис. 34).

В *смектических жидких кристаллах* (от греч. «смега» — мыло) степень упорядоченности выше. Молекулы смектика сгруппированы в слои (рис. 35). Общим для всех смектиков является слабое взаимодействие молекул между слоями. Слои легко скользят друг относительно друга, поэтому смектики на ощупь скользкие, мылоподобные.

Наиболее сложно устроены *холестерики*. Молекулы холестерика отличаются от молекул нематика тем, что имеют на своем конце отросток из одного или нескольких атомов, выступающих, торча-

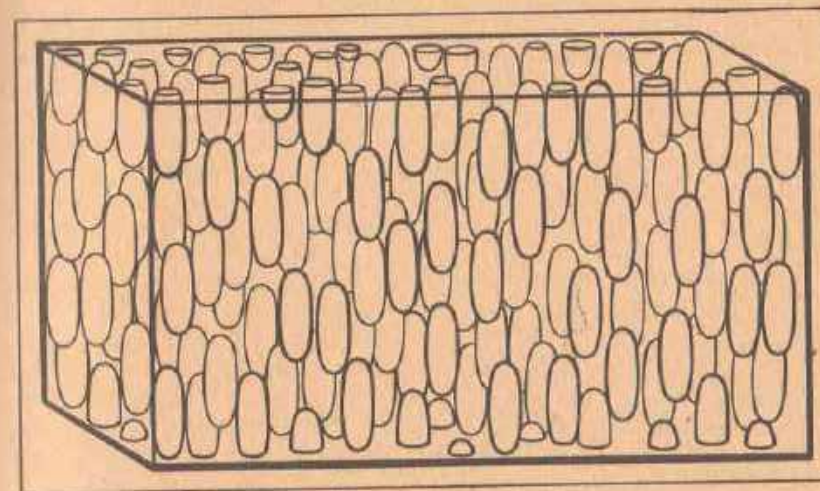


Рис. 34

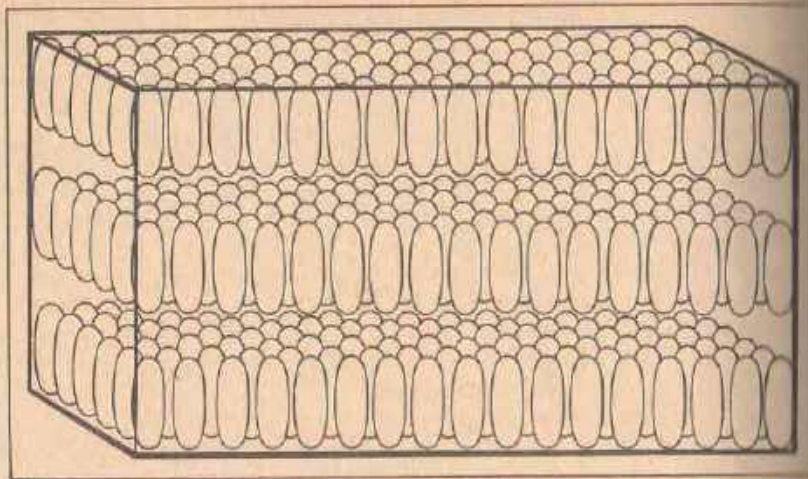


Рис. 35

щих сбоку (рис. 36). Наличие этих выступающих частей приводит к тому, что «укладка» молекул по длине сопровождается закручиванием структуры вокруг оси, перпендикулярной длинным осям молекул. Поворот осей молекул в соседних слоях невелик, полный поворот молекулы совершают примерно через 300 слоев. На шаг спирали влияют давление, воздействие электрических и магнитных полей.

Одновременное сочетание свойства кристаллов — анизотропии — и свойства жидкости — текучести — объясняется тем, что вытянутые или плоские, как дощечки, молекулы, как и в «настоящих» кристаллах, расположены упорядоченно. Но в отличие от кристаллов, где «дальний порядок» расположения атомов или молекул имеется во всех трех направлениях, в жидких кристаллах он существует лишь в одном направлении. Молекулы жидкого кристалла совершают тепловое движение весьма своеобразно. Их центры масс движутся хаотично, но оси молекул при этом перемещаются параллельно самим себе и осям других соседних молекул, сохраняя взаимную ориентацию. Зависимость свойств вещества от направления ориентации молекул вызывает макроскопическую анизотропию в большой области.

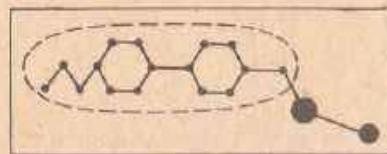


Рис. 36

Жидкокристаллическое состояние существует в определенном для каждого вещества интервале температур. У одних веществ этот интервал невелик ($\Delta T \approx 0,01$ K), у других довольно широк ($\Delta T = 120$ K). Температуры перехода из твердого в жидкокристаллическое состояние довольно различны, от -20 до $+400$ °C. При

нагревании жидкий кристалл превращается в твердый, а при охлаждении, когда ориентация молекул расстраивается тепловым движением и исчезает анизотропия, — в обычную жидкость. У жидкокристаллических тел имеется как бы две температуры плавления.

Удлиненная форма молекул вещества — условие необходимое, недостаточное для образования жидких кристаллов. Например, молекулы парафина $\text{CH}_3 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \dots$ длинные, но жидких кристаллов не образуют потому, что им не хватает жесткости: они легко изгибаются. Но и жесткость не является достаточным условием. Имеется много веществ с длинными и жесткими молекулами, но не способных образовывать жидкокристаллическое состояние. Способность вещества образовывать жидкие кристаллы определяется не только формой и механическими свойствами молекул, но и характером сил молекулярного взаимодействия.

Оптические свойства жидких кристаллов. Обычно ориентация молекул нематика распространяется не на весь объем жидкого кристалла, а лишь на небольшие его области — *домены*. На границе раздела доменов, где изменяется направление ориентации молекул, происходит изменение диэлектрической проницаемости, так как поляризуемость вдоль и поперек молекул различна. На границе раздела двух доменов происходит частичное отражение и преломление света. Поэтому нематики непрозрачны, как молоко.

Существует много способов сделать нематическую жидкость однодоменной и, следовательно, прозрачным кристаллом. Одинаково ориентировать все молекулы нематика можно легкой полировкой поверхностей стеклянных пластин, ограничивающих нематик. Для этого достаточно протереть стекло шерстяной тканью в избранном направлении. При этом образуются микроборозды глубиной и шириной всего 10 — 100 нм. Длинные молекулы нематика укладываются в эти борозды, ориентируя и остальные молекулы (рис. 37). При больших толщинах влияние борозд ослабевают. Но если разместить нематик между двумя параллельными пластинами с зазором 0,01 — 0,1 мм и расположить полировочные борозды пластин параллельно, то все молекулы тонкого слоя будут ориентированы одинаково, а полученная пленка — монокристалл нематика — будет прозрачной.

А если повернуть пластинку относительно другой на 90° вокруг оси, перпендикулярной их плоскости, то ориентация в ближайших к пластинам молекулярных слоях окажется взаимно перпендикулярной, а молекулы в объеме пленки, стремясь

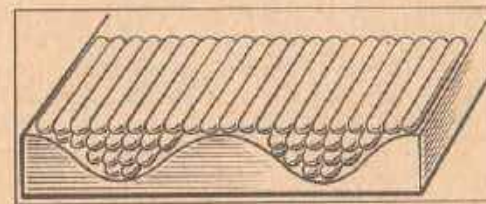


Рис. 37

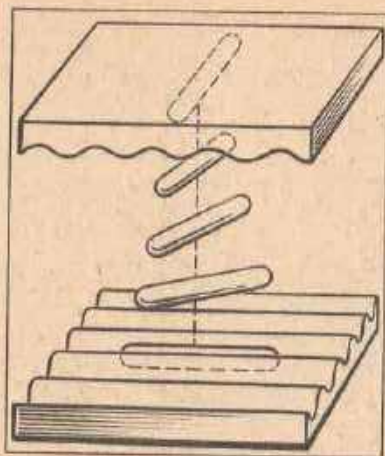


Рис. 38

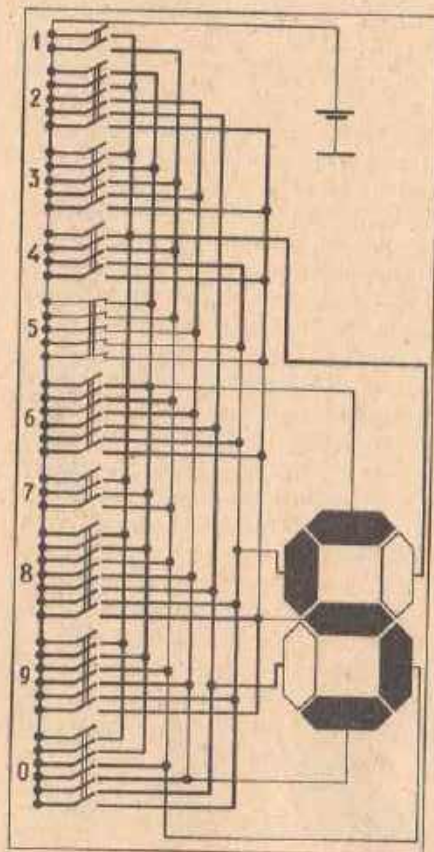


Рис. 39

равняться на молекулы, лежащие в углублениях борозд, совершат постепенный, плавный разворот на 90° (рис. 38). В итоге структура нематика окажется закрученной. Ориентацию молекул жидких кристаллов можно изменять электрическим полем.

Для технических применений очень существенно, что в жидких кристаллах, где в макроскопических областях — доменах — уже имеется ориентация молекул, для создания полной их ориентации по объему требуется не более 5 В. Часто пороговое напряжение ориентации составляет доли вольт.

Буквенно-цифровые индикаторы. Промышленность сейчас освоила индикаторы, основанные на ориентационном эффекте и на эффекте динамического рассеяния света. Наиболее просто устроен индикатор для рекламы (рис. 39). Для получения изображений цифр и букв на стеклянные пластины наносят прозрачные и токопроводящие слои оксида олова (IV) в виде шрифта, подобно «восьмеркам» на почтовых конвертах. Элементы «восьмерки» электрически изолированы. Пластины склеивают так, чтобы направления полировки совпадали, токопроводящие элементы «восьмерок» находились с внутренней стороны и были обращены друг к другу. Зазор между пластинами, составляющий 10 — 30 мкм, заполняют жидким кристаллом. К прозрачным электродам в нужной комбинации подают напряжение. В участках жидкого кристалла, находящихся под напряже-

разрушается монокристаллическая структура. Вследствие динамического рассеяния метки становятся непрозрачными и начинают сильно поглощать свет. Элементы «восьмерки», на которые подавалось напряжение, начинают «светиться», и окружающее их пространство — элементы «восьмерок» без напряжения остаются темными при прозрачности.

Основные преимущества жидких кристаллов в системах отображения информации — малое пороговое напряжение ориентации (менее 5 В), ничтожное потребление энергии. Циферблат электронных часов потребляет доли микроватта на 1 см².

инокристаллические устройства с большим числом элементов сложной электронной схемой управления могут служить в качестве телевизионных экранов.

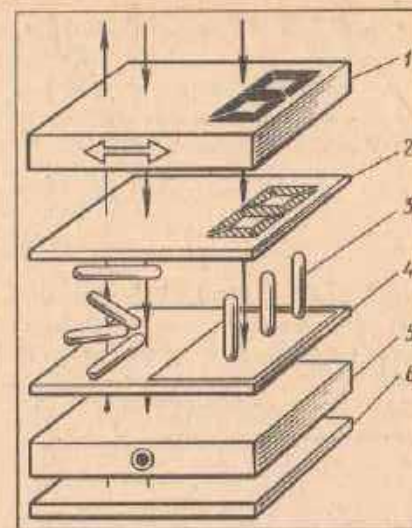


Рис. 40

- ? Что такое жидкие кристаллы?
 Какими свойствами обладают молекулы веществ, способных существовать в жидкокристаллическом состоянии?
 Какие свойства жидких кристаллов находят практическое применение?
 Как устроен буквенно-цифровой индикатор на жидких кристаллах?

§ 11. ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ¹

Примеры решения задач

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

Решение.

$$\begin{aligned} V_1 &= 1,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \\ V &= 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ v &= 1 \text{ моль} \\ N_2 &= N_A v \end{aligned}$$

N_A — ?

Постоянная Авогадро N_A равна отношению числа атомов N вещества к количеству вещества v

$$N_A = \frac{N}{v}$$

Для нахождения числа N атомов гелия в 1 моль нужно умножить концентрацию n атомов на объем V одного моля при нормальных условиях

$$N = nV.$$

Концентрацию n атомов гелия можно найти, разделив число N_1 атомов гелия (α -частиц), испускаемых 1 г радия в год, на занимаемый ими объем V_1 при нормальных условиях:

$$n = \frac{N_1}{V_1}.$$

Для определения числа атомов гелия N_1 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:

$$N_1 = 14,8 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1} \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ с} = 4,7 \cdot 10^{18}.$$

Из этих данных можно получить значение постоянной Авогадро:

$$N_A = \frac{N_1 V}{V_1 v};$$

$$N_A = \frac{4,7 \cdot 10^{18} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{1,56 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot 1 \text{ моль}} \approx 6,7 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

¹ В подборе задач и составлении заданий с выбором ответа принимал участие В. А. Орлов.

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

Решение.

$$\begin{aligned} \rho &= 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ M &= 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ N_A &\approx 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \end{aligned}$$

r — ?

Для решения задачи найдем сначала объем V , занимаемый одним атомом алюминия, который находят делением объема V_1 , занимаемого 1 моль алюминия, на число атомов алюминия в одном моле N_A :

$$V = \frac{V_1}{N_A} = \frac{m}{\rho N_A} = \frac{M v}{\rho v N_A} = \frac{M}{\rho N_A};$$

$$V = \frac{27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} \approx 1,7 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

Длина l ребра куба, занимаемого атомом, равна:

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

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

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

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

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

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

Решение.

$$\begin{aligned} p &= 10^5 \text{ Па} \\ V &= 216 \text{ м}^3 \\ M &= 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ T &= 293 \text{ К} \\ R &= 8,31 \text{ Дж/(К·моль)} \end{aligned}$$

m — ? V — ?

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

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

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

$$m = \frac{pVM}{RT};$$

$$m = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 216 \text{ м}^3 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)} \cdot 293 \text{ К}} \approx 260 \text{ кг}.$$

Так как плотность воздуха в жидком состоянии равна $\rho = 873 \text{ кг/м}^3$, то в жидком состоянии объем воздуха физического кабинета равен:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad V = \frac{260 \text{ кг}}{873 \text{ кг/м}^3} \approx 0,3 \text{ м}^3.$$

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

Решение.

$$p = 10^5 \text{ Па}$$

$$T = 373 \text{ К}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)}$$

$$\nu = 1 \text{ моль}$$

$$V = ?$$

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 постоянную Авогадро N_A :

$$V_1 = \frac{V}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A}; \quad V_1 = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{10^3 \text{ кг/м}^3 \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3.$$

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

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

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

$$pV = RT\nu; \quad V = \nu \frac{RT}{p};$$

$$V = \frac{8,31 \text{ Дж/(К} \cdot \text{моль)} \cdot 373 \text{ К} \cdot 1 \text{ моль}}{10^5 \text{ Па}} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

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

$$V_2 = \frac{V}{N_A}; \quad V_2 = \frac{3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{моль}}{6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} = 5 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3.$$

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 определилось бы выражением:

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

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:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{5 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3}{3 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3} \approx 1,7 \cdot 10^3;$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{3,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}}{3 \cdot 10^{-10} \text{ м}} \approx 12.$$

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.

Пример 5. Основываясь на представлениях молекулярно-кинетической теории, оцените давление и температуру внутри Солнца. Масса Солнца $2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$, радиус $7 \cdot 10^8 \text{ м}$. 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 $p = nkT$, откуда

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

Поскольку Солнце не расширяется и не сжимается, давление его внутренних слоев на любой глубине 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 приблизительно равной среднему значению для Солнца:

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

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 отличиями формы тяготеющих тел от точечных и шарообразных тел:

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

Тогда давление будет равно:

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

а температура:

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

Подставив числовые значения, получим оценку давления и температуры:

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

$$T = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2 \cdot 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}^2 \cdot 10^{-3} \text{ моль}^{-1}}{\frac{9}{8} \cdot 7 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ К}.$$

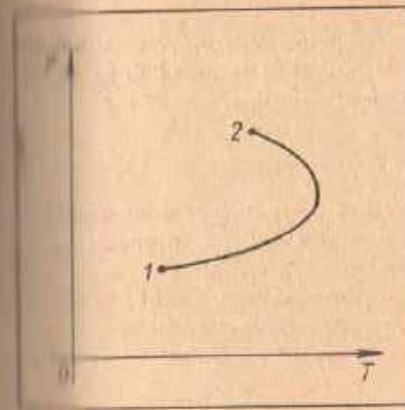


Рис. 41

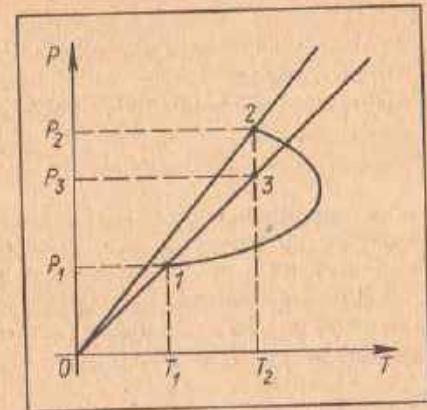


Рис. 42

Мы получили, что в недрах Солнца давление газа примерно 1 млрд. раз превышает нормальное атмосферное давление, температура составляет около 20 млн. К. Полученные результаты весьма близки к полученным более строго.

Пример 6. На рисунке 41 представлен график процесса изменения состояния идеального газа. Уменьшился или увеличился объем газа при переходе из состояния 1 в состояние 2? Масса газа постоянна.

Решение. Проведем прямые из начала координат через точки 1 и 2 (рис. 42). Эти прямые являются графиками изохорных процессов для газа при значениях объемов V_1 и V_2 . Согласно уравнению состояния идеального газа для состояний 1 и 2 можно написать 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 написать 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 42, $p_3 < p_2$. Следовательно, $V_1 > V_2$.

Пример 7. Оцените, достаточно ли кинетической энергии теплового движения молекул воздуха в комнате для того, чтобы вскипятить стакан воды.

Решение. Если температура воды в стакане равна 20°C , то количество теплоты, необходимое для нагревания этого количества воды до кипения, примерно равно:

$$Q = mc\Delta T = 0,2 \text{ кг} \cdot 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} \cdot 80 \text{ К} = 67 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

Кинетическая энергия теплового движения молекул воздуха в комнате размером $3 \times 4 \times 3 \text{ м} = 36 \text{ м}^3$ примерно равна:

$$E_k = N\bar{E} = Vn\bar{E} = \frac{3}{2}pV = \frac{3}{2} \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 36 \text{ м}^3 = 54 \cdot 10^5 \text{ Дж}$$

Следовательно, на вопрос задачи можно дать положительный ответ.

Пример 8. До какой температуры нужно нагреть воздух внутри оболочки воздушного шара объемом 500 м^3 , чтобы он мог поднять человека массой 70 кг . Масса оболочки шара равна 30 кг .

Решение. Для подъема человека архимедова сила, действующая на воздушный шар, должна превышать равнодействующую сил тяжести человека, оболочки шара и горячего воздуха в шаре:

$$F_A > (m_1 + m_2 + m_3)g.$$

Сила Архимеда равна весу воздуха, вытесненного шаром: $F_A = m_4g$, где m_4 — масса вытесненного воздуха, поэтому получаем уравнение

$$m_4 > m_1 + m_2 + m_3.$$

Значения массы m_3 воздуха в шаре и массы m_4 воздуха, вытесненного шаром, определяются из уравнения состояния идеального газа:

$$m_4 = \frac{pVM}{RT_1}, \quad m_3 = \frac{pVM}{RT_2},$$

$$\frac{pVM}{RT_1} > m_1 + m_2 + \frac{pVM}{RT_2},$$

$$T_2 > \frac{pVM}{\frac{pVM}{T_1} - (m_1 + m_2)R}.$$

Примем, что атмосферное давление равно примерно 10^5 Па , температура атмосферного воздуха 300 К , молярная масса воздуха $29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Подставляя числовые данные, получим:

$$T_2 > \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 500 \text{ м}^3 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{\frac{10^5 \text{ Па} \cdot 500 \text{ м}^3 \cdot 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{300 \text{ К}} - 100 \text{ кг} \cdot 8,31 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}} \approx 362 \text{ К}$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 1. Для осуществления физического эксперимента необходимо разогреть в замкнутом сосуде водород до температуры $2 \cdot 10^3 \text{ К}$. Какова максимальная концентрация атомов водорода в сосуде, если стенки сосуда могут выдержать давление 10^6 Па ? Каким будет давление водорода при нормальных условиях?

Задача 2. Температура атмосферы Солнца — фотосферы — равна 6000 К , плотность атомов составляет примерно 10^{15} частиц в 1 см^3 . Предполагая, что фотосфера состоит в основном из атомарного водорода, определите давление и плотность солнечной атмосферы.

Задача 3. В баллоне находится газ под давлением $2 \cdot 10^6 \text{ Па}$ при температуре 27°С . Определите давление газа в баллоне после того, как половина газа выведена из баллона, а его температура понизилась на 50 К .

Задача 4. Как изменится число столкновений молекулы газа в 1 с с другими молекулами при увеличении давления газа в два раза? Температура постоянна.

Задача 5. Как изменится температура газа при расширении, если его плотность изменяется по закону $pV^n = b$, где $b = \text{const}$?

Задача 6. Два сосуда с объемами V_1 и V_2 заполнены идеальным газом при давлениях p_1 и p_2 . Какое установится давление в сосудах, если их соединить между собой? Температура газа постоянна.

Задача 7. Воздушный шар объемом 240 м^3 при заполнении водородом при температуре 300 К поднимает полезный груз массой 300 кг . Какой полезный груз может поднять воздушный шар при заполнении его горячим воздухом при температуре 400 К ? До какой температуры нужно нагреть воздух, чтобы воздушный шар мог поднять такой же полезный груз, как и при заполнении его водородом?

Задача 8. В межзвездном пространстве имеется газообразный атомарный водород. Како концентрация составляет примерно 1 атом в 1 см^3 , температура 125 К . Вычислите давление межзвездного газа, длину пробега и интервал времени между столкновениями молекул. Радиус атома водорода равен $5 \cdot 10^{-11} \text{ м}$.

Задача 9. Оцените, каким должно быть давление азота в сосуде, чтобы при температуре 0°С длина свободного пробега его молекул была равна 1 м .

Задача 10. В трубке имеется столбик ртути высотой 10 см , отделяющий среду некоторый объем воздуха внутри трубки. При вертикальном положении трубки, когда ее открытый конец направлен вниз, длина столбика ртути над столбиком ртути равна 30 см , при горизонтальном же положении трубки длина столбика воздуха 26 см . Определите по этим данным атмосферное давление воздуха.

Задача 11. Цилиндр разделен герметичной теплоизолирующей подвижной перегородкой. При одинаковой температуре по одну сторону перегородки находится гелий, по другую — 1 моль водорода. Как изменится давление в сосуде при увеличении температуры гелия в два раза, если температура водорода при этом останется неизменной?

Задача 12. В вертикально расположенном цилиндре находится поршень, который могут проникать молекулы водорода, но не могут проникать молекулы азота. В начальный момент времени поршень находится в середине цилиндра. При одинаковом давлении p_0 над поршнем находится водород, под поршнем — азот. На какое расстояние поднимется поршень в результате диффузии водорода, если высота цилиндра l , площадь поперечного сечения S , процесс считать изотермическим, трением пренебречь.

Задача 13. Оцените, сколько молекул воздуха выйдет из открытого флакона при помещении его на $0,1^\circ \text{С}$. Объем газа во флаконе равен 20 см^3 .

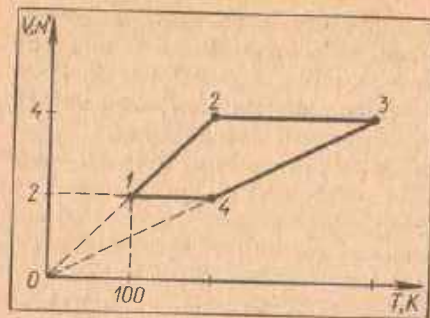


Рис. 43

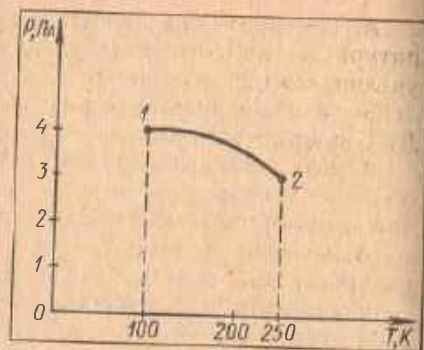


Рис. 44

Задача 14. В кастрюле-скороварке объемом 3 дм^3 находится вода массой $0,5 \text{ кг}$ при температуре 100°C . Какая доля воды в этом случае находится в газообразном состоянии?

Задача 15. На рисунке 43 представлен график зависимости объема идеального газа от температуры. Постройте для этого процесса графики зависимости давления от температуры и объема от давления. Давление газа в состоянии 1 равно 10 Па .

Задача 16. На рисунке 44 представлен график зависимости давления от температуры при переходе 1 моль водорода из состояния 1 в состояние 2. Постройте график зависимости объема от температуры для этого процесса.

Задача 17. Из баллона объемом 10^{-3} м^3 выкачивают воздух с помощью поршневого насоса. Сколько ходов поршня потребуется, чтобы в баллоне было давление 10^3 Па , если начальное значение давления воздуха 10^5 Па , а рабочий объем насоса 10^{-4} м^3 ?

Задача 18. В вертикально расположенной стеклянной трубке, площадь поперечного сечения которой S , находится ν моль водорода, а над газом — столбик ртути. При нагревании газа в трубке на $\Delta T^\circ\text{C}$ столбик ртути поднялся на высоту h . Определите массу ртути в трубке, если атмосферное давление в опыте было постоянно и равно p_0 .

Задача 19. Идеальный газ при постоянном объеме нагрет на 50 К . Какова была температура газа до нагревания, если в результате нагревания давление повысилось на 20% ?

Задание для самопроверки 1

1. В сосуде находится смесь газов водорода и азота с равной концентрацией молекул. Сравните давление водорода $p_{\text{В}}$ и азота $p_{\text{А}}$ на стенки сосуда и их средние квадратичные скорости молекул.

А. $p_{\text{В}} = p_{\text{А}}$, $v_{\text{В}} = v_{\text{А}}$. **Б.** $p_{\text{В}} = p_{\text{А}}$, $v_{\text{В}} < v_{\text{А}}$. **В.** $p_{\text{В}} = p_{\text{А}}$, $v_{\text{В}} > v_{\text{А}}$. **Г.** $p_{\text{В}} > p_{\text{А}}$, $v_{\text{В}} > v_{\text{А}}$. **Д.** $p_{\text{В}} < p_{\text{А}}$, $v_{\text{В}} < v_{\text{А}}$.

2. Как изменятся температура и давление идеального газа, заключенного в сосуд постоянного объема, если увеличить в 2 раза среднюю кинетическую энергию теплового движения молекул?

А. Температура и давление газа увеличатся в 2 раза. **Б.** Температура и давление газа увеличатся в 4 раза. **В.** Температура увеличится в 2 раза, давление газа останется неизменным. **Г.** Давление газа увеличится в 2 раза, температура останется неизменной. **Д.** Температура и давление газа останутся неизменными.

3. Как изменятся температура и давление идеального газа в сосуде постоянного объема при увеличении средней квадратичной скорости молекул в 2 раза?

А. Температура и давление газа увеличатся в 2 раза. **Б.** Температура и давление газа увеличатся в 4 раза. **В.** Температура газа увеличится в 4 раза, давление — в 2 раза. **Г.** Температура газа увеличится в 2 раза, давление — в 4 раза. **Д.** Ни один из приведенных ответов не является правильным.

4. В двух сосудах находятся кислород и водород. Чему равно отношение объема $V_{\text{В}}$ водорода к объему $V_{\text{К}}$ кислорода, если масса, давление и температура газов одинаковы?

А. 32. **Б.** $1/16$. **В.** 1. **Г.** 16. **Д.** $1/32$.

5. Как изменится температура идеального газа при увеличении его объема в 2 раза и уменьшении давления в 2 раза?

А. Не изменится. **Б.** Уменьшится в 4 раза. **В.** Увеличится в 4 раза. **Г.** Увеличится в 2 раза. **Д.** Уменьшится в 2 раза.

6. Идеальный газ в сосуде имеет температуру 1°C . На сколько нужно увеличить температуру газа, чтобы его давление при постоянном объеме увеличилось в 2 раза?

А. 1°C . **Б.** 273 К . **В.** 2°C . **Г.** 548 К . **Д.** 274 К .

7. На рисунке 45 представлен график процесса изменения состояния идеального газа. Как изменилась температура газа при переходе из состояния 1 в состояние 2?

А. Увеличилась в 16 раз. **Б.** Увеличилась в 8 раз. **В.** Увеличилась в 4 раза. **Г.** Уменьшилась в 4 раза. **Д.** Уменьшилась в 16 раз.

8. На рисунке 46 представлен график процесса изменения состояния идеального газа. Как изменился объем газа при переходе из состояния 1 в состояние 2?

А. Объем газа уменьшился в 2 раза. **Б.** Объем газа увеличился в 2 раза. **В.** Объем газа остался неизменным. **Г.** Объем газа уменьшился в 4 раза. **Д.** Объем газа увеличился в 4 раза.

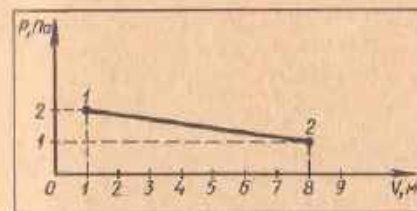


Рис. 45

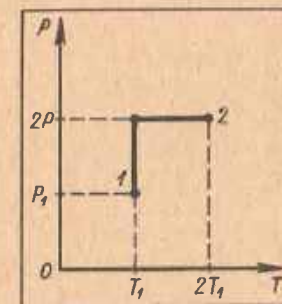


Рис. 46

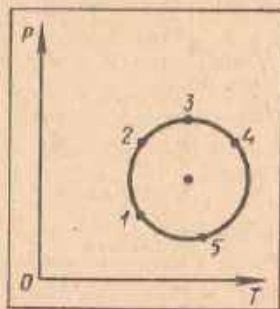


Рис. 47

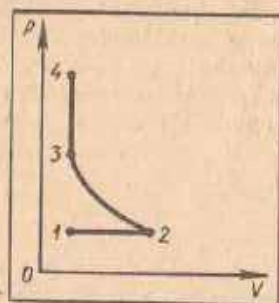


Рис. 48

9. Зависимость давления идеального газа от температуры представлена на рисунке 47. Какая точка диаграммы соответствует максимальному значению объема газа?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

10. На диаграмме $p - V$ (рис. 48) изображен график процесса, проведенного с газом. Участок 2—3 — гипербола. Какой из графиков соответствует процессу на диаграмме $V - T$ (рис. 49)?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 5. Д. 5.

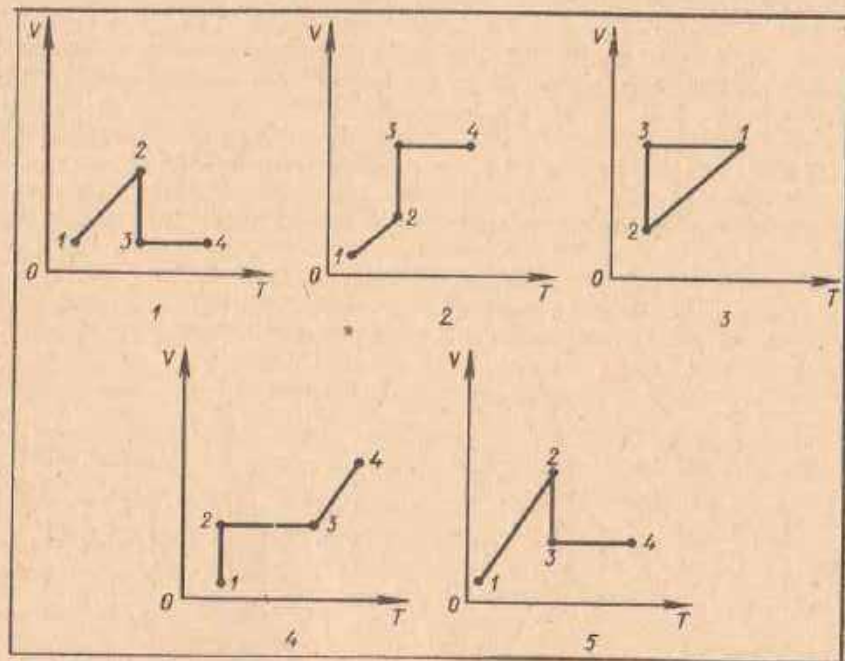


Рис. 49

11. На рисунке 50 приведен график изменения состояния идеального газа в координатах $V - T$. Какой график на диаграмме $p - T$ соответствует этому процессу (рис. 51)?

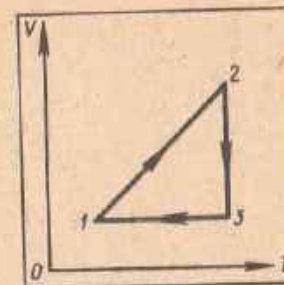
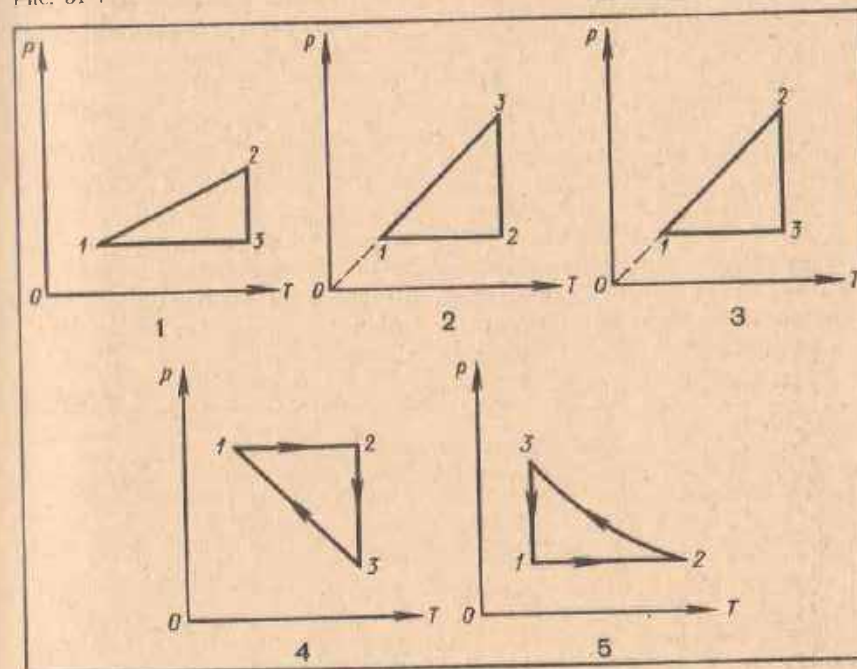


Рис. 50

Рис. 51 ↓



А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

12. На каком рисунке изображена гранецентрированная кубическая ячейка (рис. 52)?

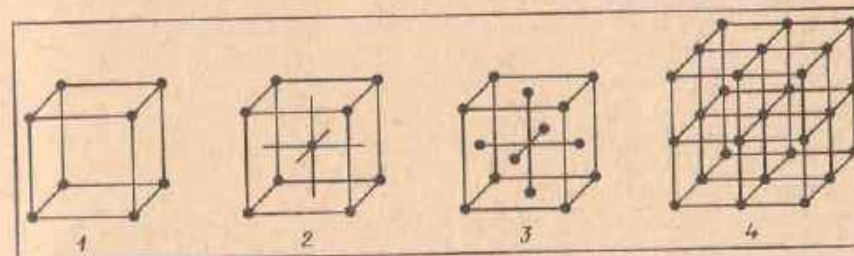


Рис. 52

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. На всех четырех.

13. Определите число атомов вольфрама, принадлежащих одной элементарной ячейке, если известно, что его пространственная решетка объемно-центрированная, кубическая.

А. $1 + 8 \cdot 1 = 9$. Б. $1 + 8 \cdot \frac{1}{2} = 5$. В. $1 + 8 \cdot \frac{1}{4} = 3$. Г. $1 + 8 \cdot \frac{1}{8} = 2$. Д. Ни один из ответов А — Г не является правильным.

14. Во сколько раз изменится частота столкновений ν молекулы идеального газа и средняя длина ее свободного пробега λ при увеличении давления в 2 раза? Температура газа остается постоянной.

А. ν увеличится в 2 раза, λ увеличится в 2 раза. Б. ν уменьшится в 2 раза, λ уменьшится в 2 раза. В. ν увеличится в 2 раза, λ уменьшится в 2 раза. Г. ν уменьшится в 2 раза, λ увеличится в 2 раза. Д. ν и λ останутся неизменными.

15. Как изменится средний квадрат $\overline{x^2}$ смещения броуновской частицы при увеличении температуры T жидкости в два раза и увеличении интервала времени Δt между двумя последовательными моментами наблюдения частицы?

А: Увеличится в $\sqrt{2}$ раза. Б. Увеличится в 2 раза. В: Увеличится в 4 раза. Г. Увеличится в 16 раз. Д. Останется неизменным.

§ 12. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание 1. Наблюдение сцинтилляций в спинтарископе

Оборудование: школьный спинтарископ.

Содержание и метод выполнения задания

Одним из самых простых способов регистрации отдельных атомов является сцинтилляционный способ. Сцинтилляцией называют световую вспышку, возникающую в некоторых кристаллах при попадании в них быстро движущихся атомов или других частиц.

На рисунке 53 представлена схема устройства спинтарископа — прибора, предназначенного для наблюдения свечения экрана, вызываемого отдельными α -частицами. На острое 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.

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 наблюдайте сцинтилляции, вызываемые α -частицами.

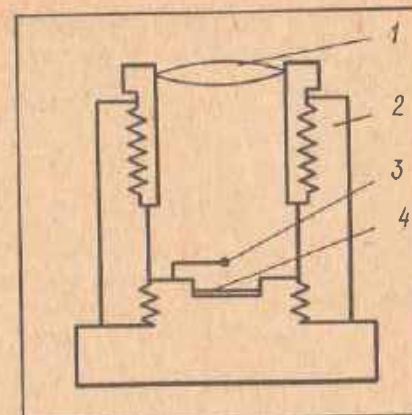


Рис. 53

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 насос вакуумный 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 прорезами (рис. 54).

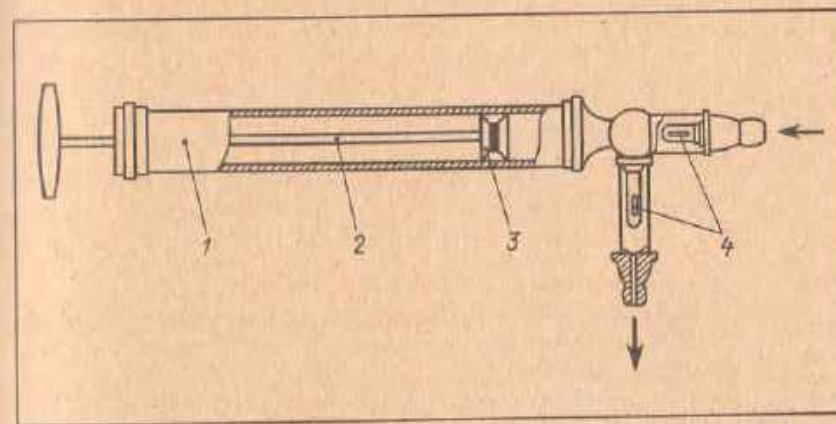


Рис. 54

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 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.

Возможный вариант выполнения задания

Соединив с помощью резинового шланга ручной насос с полным 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 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

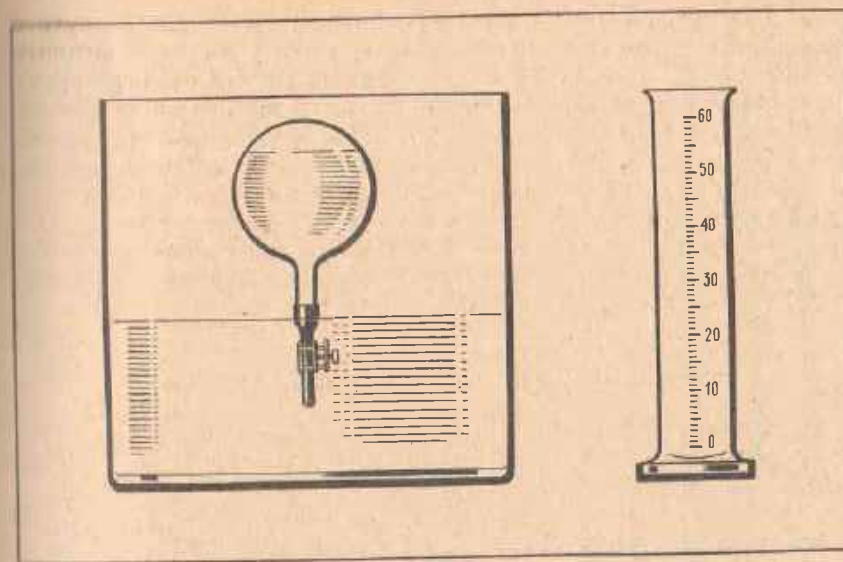


Рис. 55

воздуха в нем не станет равным атмосферному (рис. 55). 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

Предложите метод определения атмосферного давления с помощью имеющегося оборудования. Произведите необходимые измерения и определите атмосферное давление.

Оборудование: стеклянная трубка с пробкой, резиновый шланг, воронка, стеклянная, линейки ученические, штатив лабораторный, вода.

Указания. Для определения атмосферного давления можно осуществить изотермический процесс расширения определенной массы воздуха, заключенной в стеклянную трубку между поверхностью воды и резиновой пробкой.

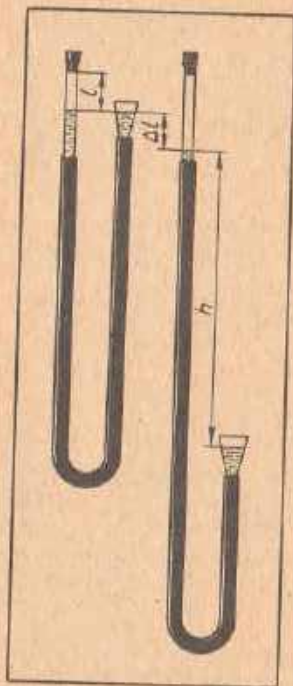


Рис. 56

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

Соединим стеклянную трубку и воронку резиновой трубкой, укрепим их в штативе (рис. 56). 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 для двух изотермических 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.

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 конденсации паров 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. 57). 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 встречающегося на ее пути атома, в результате чего вдоль траектории движения α -частицы в газе образуется плотная колонка положительных и отрицательных ионов.

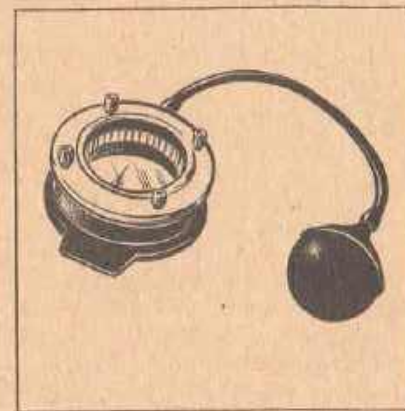


Рис. 57

Если во время движения α -частицы в камере имеется пересыщенный пар, на ионах происходит конденсация капель жидкости и вдоль траектории движения частицы образуется полоска тумана — трек.

Для выполнения опытов камеру предварительно с помощью резиновой груши наполняют 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, повторите операция сжатия и разрежения несколько раз, изменяя степень сжатия.

Скорость расширения газа в камере, также оказывающую влияние на успешность результатов, можно регулировать, изменяя отверстие, 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, коллекция «Металлы и сплавы».

Содержание и метод выполнения задания

Почти все твердые тела состоят из кристаллов, однако обнаружить их кристаллическое строение путем внешнего осмотра уда-

ется далеко не всегда. Характерный признак кристалла — наличие плоских граней. Большинство природных и искусственно изготовленных твердых тел имеет поликристаллическое строение. При рассматривании 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. Грани отдельных кристаллов на свежих изломах 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 называют однородную смесь, в которой молекулы одного вещества равномерно распределены между молекулами другого. Взаимное растворение двух веществ имеет некоторые пределы, которые зависят от природы растворителя, растворимого вещества и температуры.

Цель настоящей работы — наблюдение процесса роста кристаллов различных веществ в пересыщенном водном растворе. Для этого небольшое количество насыщенного раствора помещают на предметное стекло под объектив микроскопа. Испарение воды делает раствор пересыщенным, и в нем начинается кристал-

лизация. Процесс кристаллизации удобно наблюдать в микроскоп с 80-кратным увеличением, используя объектив с 8-кратным и окуляр с 10-кратным 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 винт следует вращать 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, гидрохинона.

Задание 7. Выращивание кристаллов

Оборудование: порошок алюмокалиевых квасцов, термометр лабораторный, дистиллированная вода, химические стаканы, плитка электрическая, 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 58 показана зависимость растворимости алюмокалиевых квасцов от температуры. График позволяет увидеть, что при охлаждении насыщенного при температуре 40 °С раствора до температуры 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 выделяется 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 тонкой нити (волосе) или тонкой леске, предварительно обработанной спиртом (рис. 59).

Можно вырастить кристалл и без затравки. Для этого нить или леску обрабатывают спиртом и опускают в раствор так, чтобы конец висел свободно. На конце нити 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.

Порядок выполнения задания

1. Тщательно вымойте два стакана и воронку, подержите их над паром.

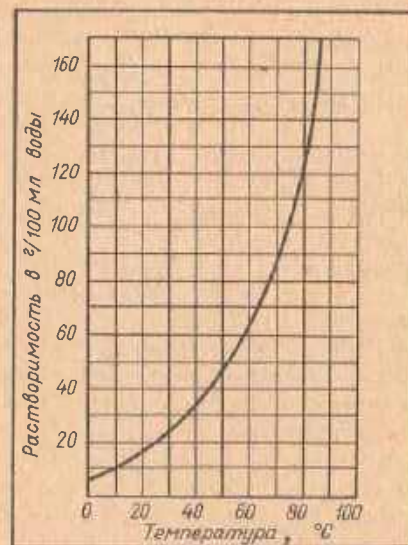


Рис. 58

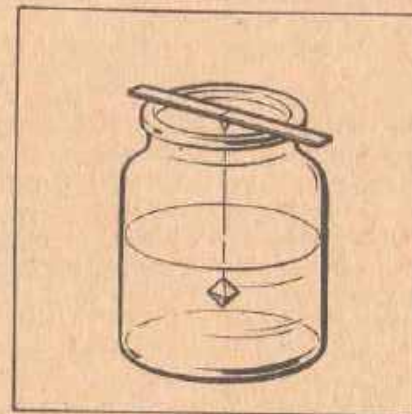


Рис. 59

2. Налейте дистиллированную (или дважды прокипяченную) воду массой 100 г в стакан и нагрейте ее до температуры 30°C. 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 нити или леске и опустите его в раствор. Нить 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 обсушите бумажной салфеткой и уложите в специальную коробку. Руками кристалл не трогайте, иначе он потеряет прозрачность.

Домашнее лабораторное задание

Таким же способом, какой предложен в задании 7, приготовьте дома насыщенный раствор поваренной соли и попробуйте вырастить в нем крупные кристаллы.

ГЛАВА II. ТЕРМОДИНАМИКА

§ 13. 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 находится идеальный газ. Объем газа V_1 , его давление p_1 , температура T_1 . Какими будут давление p_2 и температура T_2 газа при уменьшении объема газа до V_2 ?

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

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

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 и произведем резкий удар ладонью по рукоятке (рис. 60). 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? Можно предположить, что возрастание температуры

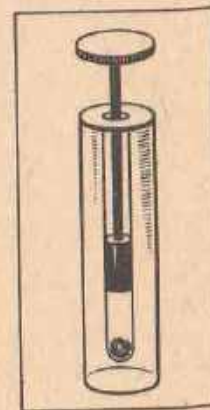


Рис. 60

газа при сжатии происходит в результате столкновений молекул с движущимся поршнем. Однако 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. Этот пример показывает, что во многих случаях 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 многих 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, изолированную от взаимодействия с другими телами, называют 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 .

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

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

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:**

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

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

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 — *микроскопическим* способом 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 $A = -\Delta U_{\text{в}}$, совершенную над системой, и количество переданной ей теплоты $Q = -\Delta U_{\text{с}}$:

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

Эту форму выражения закона сохранения и превращения энергии называют 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.**

«Вечный двигатель». 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, являющихся частями этой машины, и без теплопередачи от внешних тел, в физике называют «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 формулируют так: создание «вечного двигателя первого рода» невозможно.

- ? Чем отличается термодинамический метод от метода моделей?
Что называют термодинамической системой?
Как доказать невозможность создания «вечного двигателя»?

§ 14. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ, ЖИДКОСТЕЙ И ТВЕРДЫХ ТЕЛ

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:

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

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 состояния.

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

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

Применение 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

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

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

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

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 произвести нагреванием на ΔT путем теплопередачи $\Delta U = Q = c_1 m \Delta T$. Отсюда для определения удельной теплоемкости c_1 получаем выражение:

$$c_1 = \frac{Q}{m \Delta T} = \frac{A}{m \Delta T}.$$

Следовательно, для определения удельной теплоемкости c_1 вещества нужно измерить работу A , совершенную внешними силами, действующими на тело, и измерить наблюдаемое в результате совершения работы изменение температуры тела в условиях отсутствия теплообмена его с другими телами. Такого рода эксперименты были в 1843 г. впервые выполнены Джеймсом Джоулем. В этих опытах было определено соотношение между единицей измерения количества теплоты и единицей измерения работы, т. е. найден механический эквивалент теплоты.

Теплоемкость идеального газа при постоянном объеме. 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 работы A . Поэтому в отличие от такой, например, неизменной характеристики вещества, как его молярная масса M , удельная теплоемкость зависит от условий, при которых происходит передача тепла.

Рассмотрим случай передачи тепла идеальному газу при условии неизменности занимаемого им объема.

Условие передачи тепла газу при постоянном объеме выбрано нами не случайно. Работа, совершаемая внешними силами над газом, при постоянном объеме равна нулю: $A = 0$. Из первого закона термодинамики $\Delta U = Q + A$ следует, что в этом случае количество переданного газу тепла равно изменению его внутренней энергии: $Q = \Delta U$. Поэтому удельную теплоемкость газа при постоянном объеме можно найти, вычислив изменение внутренней энергии газа массой 1 кг при изменении его температуры на 1 К:

$$c_v = \frac{Q}{m \Delta T} = \frac{\Delta U}{m \Delta T}. \quad (14.1)$$

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 :

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

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

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

Отсюда получаем:

$$c_v = \frac{\frac{3}{2} k \Delta T N}{m \Delta T} = \frac{3}{2} k \frac{N}{m} = \frac{3}{2} \frac{k N_A m}{m M} = \frac{3}{2} \frac{R}{M}, \quad (14.2)$$

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 · К)	$6,2 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^3$	$3,1 \cdot 10^3$	$2,8 \cdot 10^3$
c_v (эксп), Дж/(кг · К)	10^4	$3,1 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^3$	$6,3 \cdot 10^2$
$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}$, Дж/(кг · К)	10^4	$3,1 \cdot 10^3$	$7,4 \cdot 10^2$	$3,1 \cdot 10^3$	$5,7 \cdot 10^2$

Чем же отличаются гелий и аргон от остальных газов? Существенным их отличием от водорода, азота и углекислого газа является

ся 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 кинетическая энергия 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 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 для поступательного движения (рис. 61).

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

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M} \quad (14.3)$$

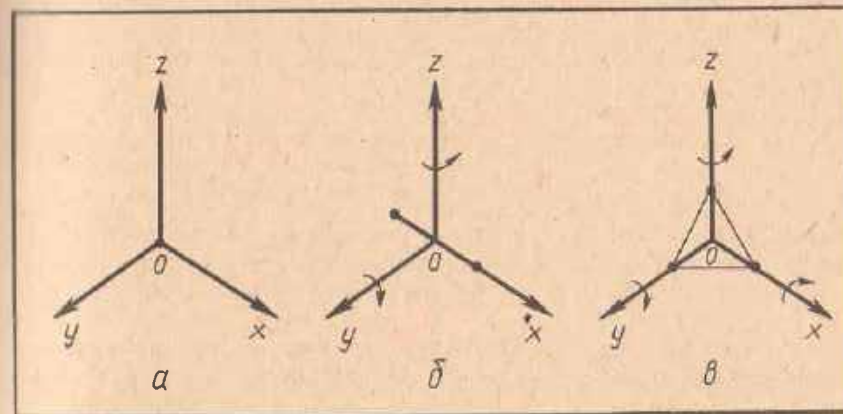


Рис. 61

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 теплоты Q , переданной 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, в расчетах можно пользоваться 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

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

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

$$c_p = c_v + \frac{A'}{m\Delta T}. \quad (14.4)$$

Работа идеального газа при изобарном расширении определяется выражением

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

Отсюда для удельной теплоемкости идеального газа при постоянном давлении получаем выражение

$$c_p = c_v + \frac{R}{M}. \quad (14.5)$$

Молярные теплоемкости $C_p = c_p M$ и $C_v = c_v M$, т. е. теплоемкости одного моля вещества, связаны уравнением

$$C_p = C_v + R. \quad (14.6)$$

Адиабатный процесс. Используя связь между теплоемкостью идеального газа при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v , найдем уравнение адиабатного процесса. На основании первого закона термодинамики при адиабатном расширении работа A' одного моля идеального газа равна изменению внутренней энергии газа ΔU , взятому с противоположным знаком:

$$A' = -\Delta U, \quad p\Delta V = -C_v\Delta T.$$

Из уравнения состояния для одного моля идеального газа можно получить:

$$\Delta(pV) = R\Delta T,$$

$$\begin{aligned} \Delta(pV) &= (p + \Delta p)(V + \Delta V) - pV = \Delta pV + \Delta Vp + \Delta p\Delta V \approx \\ &\approx \Delta pV + \Delta Vp, \end{aligned}$$

$$\Delta T \approx \frac{\Delta pV + \Delta Vp}{R} = \frac{\Delta pV + \Delta Vp}{C_p - C_v}.$$

Из этих двух уравнений получаем:

$$p\Delta V + \frac{C_v}{C_p - C_v}(\Delta pV + \Delta Vp) = 0,$$

или

$$\left(\frac{C_p - C_v}{C_v} \right) p\Delta V + \Delta pV + p\Delta V = 0,$$

$$\frac{C_p}{C_v} p\Delta V + \Delta pV = 0.$$

Обозначим отношение

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma. \quad (14.7)$$

Тогда

$$\gamma p\Delta V + \Delta pV = 0.$$

Последнее равенство выполняется, если объем и давление идеального газа связаны уравнением

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (14.8)$$

Это уравнение называют *уравнением Пуассона*.

Действительно, если произведение pV^γ постоянно, его изменение при любых изменениях давления и объема равно нулю:

$$\Delta(pV^\gamma) = 0. \quad (14.9)$$

Можно доказать, что при бесконечно малых приращениях Δp и ΔV из уравнения (14.9) следует:

$$\gamma V^{\gamma-1} \Delta V p + \Delta p V^{\gamma} = 0,$$

или

$$\gamma p \Delta V + \Delta p V = 0.$$

Для идеального одноатомного газа показатель степени γ в уравнении адиабаты равен:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\frac{5}{2} R}{\frac{3}{2} R} = \frac{5}{3} \approx 1,7,$$

для двухатомного соответственно:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\frac{7}{2} R}{\frac{5}{2} R} \approx 1,4.$$

Используя уравнение состояния идеального газа, уравнение адиабаты можно представить еще в двух видах:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}; \quad (14.10)$$

$$\frac{p^{\gamma-1}}{T^{\gamma}} = \text{const}. \quad (14.11)$$

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 и 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. $2 \left(\frac{1}{2} kT \right) = kT$. Полная энергия колебательного движения одной молекулы равна $3kT$. Отсюда изменение внутренней энергии твердого тела при изменении его температуры на ΔT равно:

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

удельная теплоемкость вещества в твердом состоянии равна:

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

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 равнораспределения 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 Пьером Дюлонгом и Алексисом 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.

Классическая теория теплоемкости столкнулась с еще одним затруднением. Твердые тела по их электрическим свойствам делятся на металлы и диэлектрики. В диэлектриках нет свободных электронов. Согласно закону равнораспределения 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 теплоемкость электронного газа. В действительности теплоемкость 1 моль металла не отличается от теплоемкости диэлектриков и равна $3R$.

Из сказанного следует, что рассмотренная нами классическая теория теплоемкости твердых тел является очень грубым приближением к действительности. Основные особенности поведения твердых тел в процессах теплопередачи объясняет квантовая теория теплоемкости.

Как можно определить удельную теплоемкость вещества, не располагая сведениями об удельной теплоемкости каких-либо других веществ?

Почему удельная теплоемкость некоторых газов совпадает с теоретически предсказанной для идеального газа, а в других случаях не совпадает?

Какие тепловые свойства веществ не могла объяснить классическая теория?

§ 15. ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

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 $3 \cdot 10^{20}$ 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 180 млн. Дж в сутки, а в Советском Союзе потребление на одного человека составляет в среднем около 700 млн. Дж в сутки, т. е. примерно в 4 раза больше, чем в среднем в мире.

Много это или мало — 700 млн. Дж? Для сравнения вычислим кинетическую энергию искусственного спутника Земли массой 10 кг, движущегося со скоростью 8 км/с:

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

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 одним человеком за неделю, достаточна для сообщения первой космической скорости и самому человеку!

Можно оценить среднюю энерговооруженность человека и по-другому. Суточное потребление энергии из пищи в процессе обмена веществ в организме человека колеблется в пределах $10^7 - 2 \times 10^7$ 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 $(0,5 - 1) \cdot 10^6$ Дж. Например, при подъеме на гору высотой 2 км с рюкзаком массой 35 кг турист совершает полезную работу $7 \cdot 10^5$ Дж.

Если при интенсивной физической нагрузке человек совершает работу $7 \cdot 10^5$ Дж, а потребляет в среднем за сутки $700 \cdot 10^6$ Дж, то это значит, что на каждого человека в нашей стране работают различные тепловые машины, выполняющие работу 1000 человек.

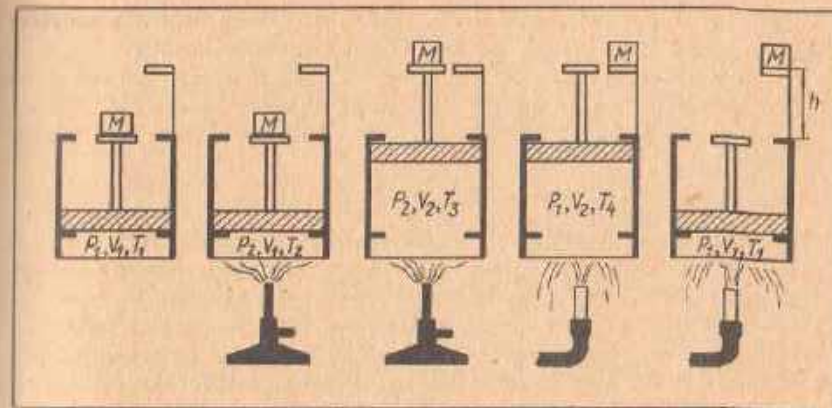


Рис. 62

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.

Рабочий цикл теплового двигателя. Рассмотрим 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. 62).

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 теплоты Q газу, заключенному в цилиндре. Для этого поместим на поршень тело массой M , предвзявательно 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 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. 63). Значение температуры T_2 в конце изохорного процесса однозначно определяется значениями давления p_2 и объема V_1 через уравнение состояния идеального газа.

Поскольку при изохорном процессе не совершается работа, то в

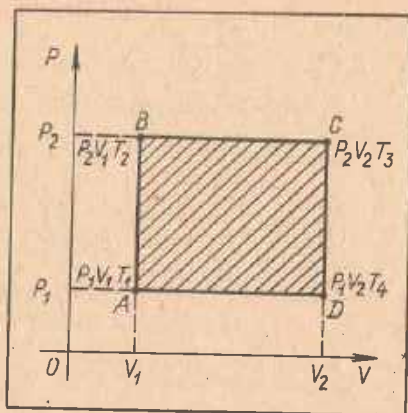


Рис. 63

температура T_3 в конце изобарного 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 63.

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

В процессе изобарного расширения газу было сообщено количество теплоты Q_{BC} , которое было израсходовано на совершение работы A'_{BC} при поднятии 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:

$$A'_{BC} = Fh = p_2Sh = p_2(V_2 - V_1),$$

где h — ход поршня.

Казалось бы, цель достигнута, груз поднят. Однако подобная машина однократного 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. 63) соответствует изохора CD . Температура T_4 в конце изохорного 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, 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 изохорного 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 изобарного сжатия газа охлаждающая вода получила от газа количество теплоты Q_{DA} , над газом была совершена работа по сжатию 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, называют круговыми или циклическими. Рабочий цикл рассмотренной тепловой машины состоит из двух изохор и двух изобар, образующих на диаграмме $p - V$ прямоугольник $ABCD$ (рис. 63).

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

Как видно из рисунка 63, площадь прямоугольника $ABCD$ на диаграмме $p - V$ равна:

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

Если S — площадь поршня, то

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

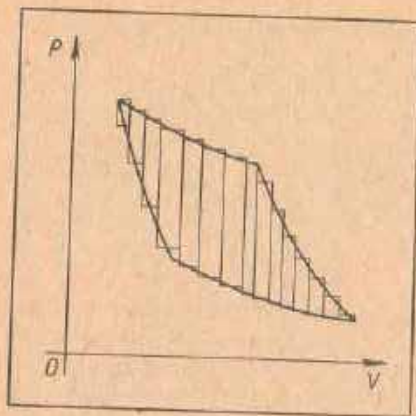


Рис. 64

тогда

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

Если при рабочем цикле состояние газа в цилиндре изменялось не по изохорному и изобарному законам, а каким угодно другим путем, то диаграмму цикла можно приблизительно представить как совокупность циклов, состоящих из двух изохор и двух изобар (рис. 64). Отсюда можно сделать вывод, что работа, совершаемая газом в результате изменений его состояний по любому замкнутому

циклу, пропорциональна площади цикла на диаграмме $p-V$. 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:

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

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:

$$A' = -A, A' = Q,$$

получим для коэффициента полезного действия тепловой машины следующее выражение:

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

Впервые на необходимость использования для работы тепловой машины двух тел с различными температурами нагревателя и холодильника указал французский инженер Садик Карно в работе «Размышление 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.



С. Карно

Цикл Карно. Рассмотрим цикл работы идеальной тепловой машины, называемой циклом Карно. Этот цикл состоит из двух изотерм и двух адиабат. Сначала рабочее тело (идеальный газ) имеет температуру T_1 , равную температуре нагревателя, и находится в тепловом контакте с нагревателем. При тепловом контакте с нагревателем газ изотермически расширяется. Этот процесс представлен участком 1—2 диаграммы на рисунке 65. Затем теплопередача от нагревателя прекращается и рабочему телу предоставляется возможность адиабатно расширяться (участок диаграммы 2—3). Процесс адиабатного расширения продолжается до тех пор, пока температура газа (рабочего тела тепловой машины) не станет равной температуре T_2 холодильника. В этот момент (точка 3 на диаграмме) адиабатное расширение прекращается и рабочее тело приходит в тепловой контакт с холодильником.

При постоянной температуре T_2 холодильника производится изотермическое сжатие до состояния, отмеченного точкой 4 на диаграмме. Точка 4 является пересечением адиабаты, проходящей через точку 1, и изотермы, проходящей через точку 3. Из состояния 4 газ адиабатным сжатием возвращается в начальное состояние 1.

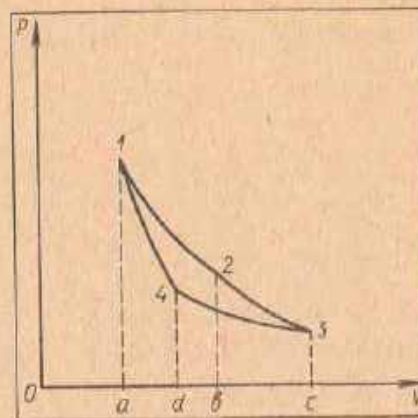


Рис. 65

При изотермическом расширении газ получает от нагревателя количество теплоты Q_1 , а при изотермическом сжатии передает холодильнику количество теплоты Q_2 . При адиабатном расширении и сжатии теплопередача не происходит, — следовательно, общее количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя за цикл, равно Q_1 , а отданное холодильнику — Q_2 .

КПД идеальной тепловой машины. Так как внутренняя энергия газа после завершения цикла принимает первоначальное значение, работа за цикл равна:

$$A' = Q_1 - Q_2,$$

а КПД тепловой машины равен:

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

Так как при изотермическом расширении и сжатии идеального газа его внутренняя энергия не изменяется, то по первому закону термодинамики количество теплоты Q_1 равно работе, совершенной газом при расширении, а количество теплоты Q_2 — работе внешних сил при сжатии газа. Значения Q_1 и Q_2 пропорциональны соответственно площади фигур $a 12 b$ и $c 34 d$ (рис. 65). Площадь этих фигур равны:

$$Q_1 = \frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1},$$

$$Q_2 = \frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4},$$

где символ $\ln$ означает логарифм по основанию $e \approx 2,72$.

Используя уравнение адиабаты, можно доказать равенство

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}.$$

Отсюда КПД идеальной машины, работающей по циклу Карно, равен:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Используя постулат о невозможности создания тепловой машины, единственным результатом работы которой был бы перенос количества теплоты от холодного тела к горячему, Карно доказал, что любая тепловая машина, работающая по замкнутому циклу, имеет КПД, не превышающий КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно.

Замечательной особенностью идеальной тепловой машины Карно является ее обратимость. Каждый из процессов, адиабатный и изотермический, может быть совершен точно так же в обратном направлении, как и в прямом. Поэтому совершив все процессы цикла Карно в обратном направлении, т. е. из состояния 3 в состоя-

ние 2, затем 2 — 1 — 4 — 3, можно за счет работы A внешних сил передать количество теплоты Q_1 нагревателю, забрав количество теплоты Q_2 у холодильника:

$$Q_1 = Q_2 + A.$$

Эту особенность воображаемой идеальной тепловой машины использовал Карно при доказательстве невозможности создания тепловой машины с КПД, превышающим КПД идеальной тепловой машины.

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.

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

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

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.

- ?
- Какие процессы называются круговыми или циклическими?
 - Что необходимо для осуществления кругового процесса?
 - Чем определяется КПД тепловой машины?
 - Какие пути существуют для повышения КПД тепловых машин?
 - Какие процессы используют в круговом цикле идеальной тепловой машины (цикле Карно)?
 - Докажите, что невозможно создание тепловой машины с КПД, превышающим КПД идеальной тепловой машины.

§ 16. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ МАШИН

Паровая машина И. И. Ползунова. Первые практически действующие универсальные паровые машины были созданы русским изобретателем И в а н о м Ивановичем Ползуновым и англичанином Д ж е м с о м У а т т о м. Схема машины И. И. Ползунова показана на рисунке 66.

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 заливали водой. Посредством тяг 10 и полубалансиров 9 с цепями движение поршней было взаимосвязанным, согласованным.

В положении, изображенном на рисунке 66, 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

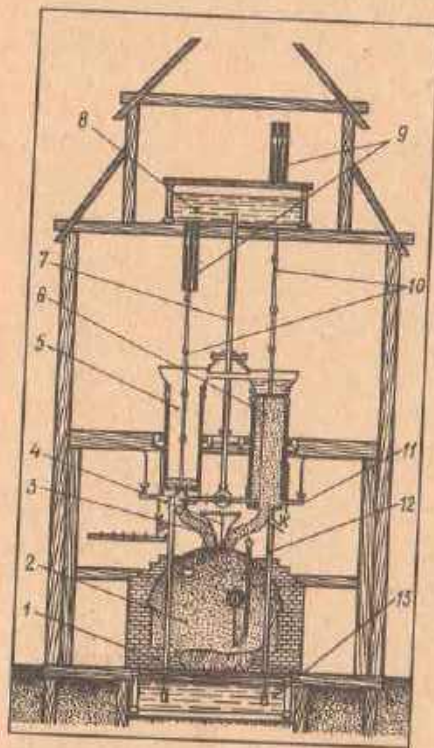
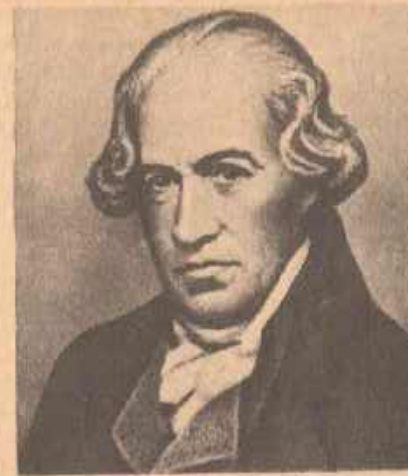


Рис. 66



И. И. Ползунов



Д. Уатт

правый цилиндр, по трубам 7 из бака 8 в него впрыскивали воду. 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 впрыскивали воду, а в правый подавали пар. Затем происходило повторение рабочих процессов, в результате которых полубалансиры совершали возвратно-вращательное движение. Попадавший в цилиндр воздух выпускался через клапаны воздушных труб 11. Оработанная 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, обеспечивающими дутьем три медеплавильные печи.

В отличие от предшествующих ей машин, работавших рывками и выполнявших роль только 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. Уатт

два цилиндра заменил 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: нагреватель, в котором освобождалась энергия топлива; водяной пар как рабочее тело и поршень с цилиндром, преобразующий внутреннюю энергию пара в механическую энергию; 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 большей мощности это вынуждало делать цилиндры диаметром около 2 м с ходом поршня 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%.

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

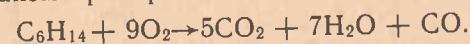
Первый двигатель внутреннего сгорания был создан в 1860 г. французским инженером **Этьеном Ленуаром**. Этот двигатель не имел трубы, топки и котла, но в основном конструктивно не отличался от паровой машины. Вместо пара в цилиндр при движении поршня засасывалась смесь светильного газа и воздуха. Когда 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 **Боденом** было предложено использовать в двигателе внутреннего сгорания **четырёхтактный цикл**: 1) всасывание, 2) сжатие, 3) горение и расширение, 4) выхлоп.

Эта идея была использована немецким изобретателем **Н. Отто**, построившим в 1878 г. первый четырёхтактный газовый двигатель внутреннего сгорания. КПД этого двигателя достигал 22%, что превосходило значения, полученные при использовании двигателей всех предшествующих типов.

Карбюраторный двигатель. Развитие нефтяной промышленности в конце XIX в. дало новые виды топлива — керосин и бензин. В бензиновом двигателе для более полного сгорания топлива перед впуском в цилиндр его смешивают с воздухом в специальных смесителях, называемых **карбюраторами**. Воздушно-бензиновую смесь называют **горючей смесью**.

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 $m_{\text{в}}$ и бензина $m_{\text{б}}$ 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:

$$\frac{m_{\text{б}}}{m_{\text{к}}} = \frac{M_{\text{б}}}{M_{\text{к}}} = \frac{86}{32}.$$

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:

$$\frac{m_{\text{б}}}{m_{\text{в}}} = \frac{0,23 M_{\text{б}}}{9 M_{\text{к}}} = \frac{0,23 \cdot 86}{9 \cdot 32} \approx \frac{1}{15}.$$

Мы получили, что для полного сгорания смеси на бензин массой 1 кг должно приходиться не менее 15 кг воздуха. Это означает, что рабочим телом в двигателях внутреннего сгорания фактически является воздух, а не пары бензина. В отличие от паровых машин топливо здесь 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

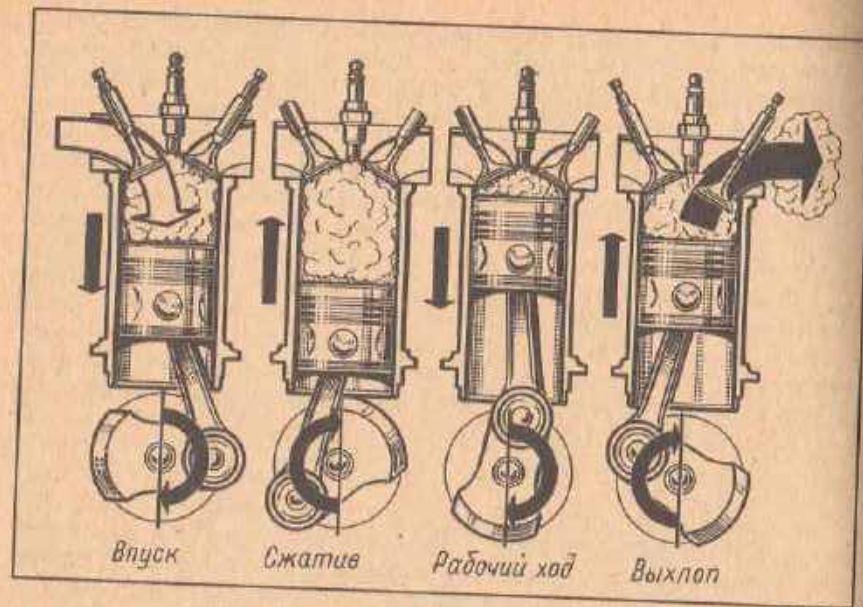


Рис. 67

впускной клапан происходит засасывание горючей смеси в цилиндр (рис. 67). Этот процесс происходит при постоянном давлении. При обратном ходе поршня начинается сжатие горючей смеси. Сжатие происходит быстро, и поэтому процесс близок к адиабатному. На диаграмме $p - V$ ему соответствует участок AB (рис. 68).

В конце такта сжатия происходит воспламенение горючей смеси электрической искрой. Быстрое сгорание паров бензина сопровождается передачей рабочему телу — воздуху — количества

теплоты 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 изохорным и изобразить его на диаграмме $p - V$ участком BC .

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

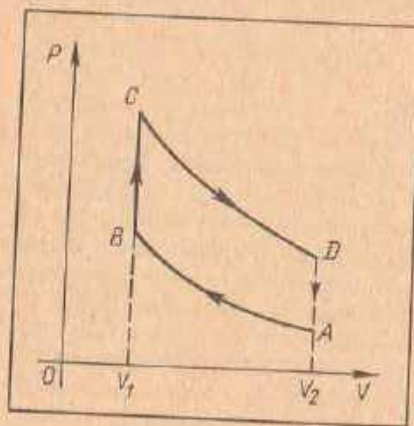


Рис. 68

V_1 близок к адиабатному, 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 теплоты 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 внутренней сгорания важной характеристикой, определяющей полноту сгорания топлива и значительно влияющей на значение 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 степень сжатия 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 адиабатного сжатия воздуха его температура повышается до 600—700°C. Горючее, впрыскиваемое с помощью топливного насоса через форсунку, воспламеняется при соприкосновении с раскаленным воздухом.

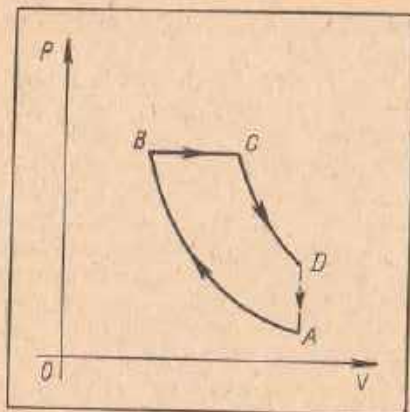


Рис. 69

коэффициент полезного действия дизельных двигателей обусловлен тем, что вследствие более высокой степени сжатия начальная температура горения смеси (480 — 630°C) у них выше, чем у карбюраторных двигателей (330 — 480°C). 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 бензина массой 1 кг требуется воздуха массой около 15 кг. Казало бы, увеличение 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% бензино-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.

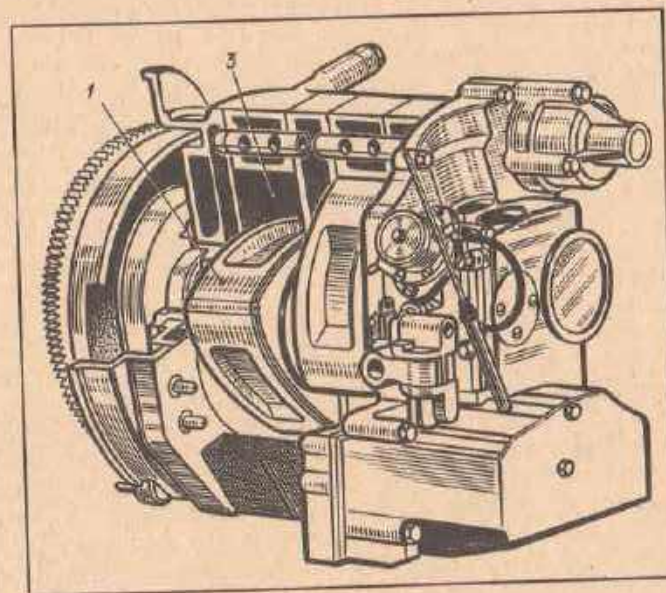
Двигатель Ванкеля. Патент на *роторно-поршневой двигатель* внутреннего сгорания немецкий инженер Феликс Ванкель получил в 1929 г., однако первый работоспособный *роторный двигатель* был построен лишь в 1957 г. В настоящее время серийное производство автомобилей с роторными двигателями осуществляется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

Подача топлива управляет особым регулятором, в результате чего процесс горения протекает не столь кратковременно, как в карбюраторном двигателе. Поэтому часть процесса расширения, пока осуществляется подача топлива, происходит изобарно, а затем адиабатно. При обратном движении поршня осуществляется выхлоп. Диаграмма цикла в двигателе Дизеля представлена на рисунке 69.

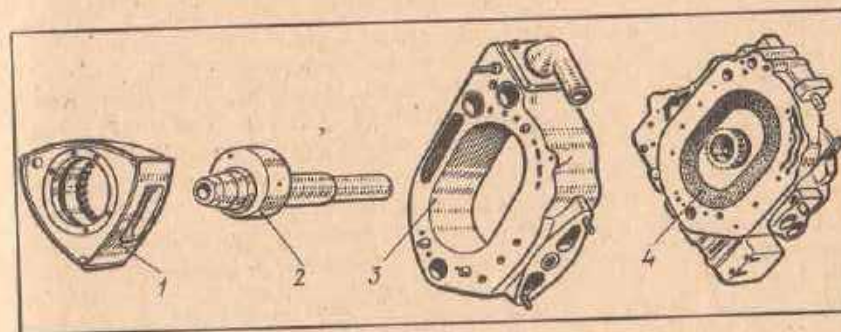
Современные дизели имеют степень сжатия $\epsilon = 16 - 21$ и КПД около 40%. Более высокий

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 показано на рисунке 70, а, б. 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



а



б

Рис. 70

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.

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.

Факельное зажигание. Одна из причин недостаточно высокого КПД двигателей внутреннего сгорания — неполное сгорание горючей смеси в цилиндрах. Для обеспечения работы карбюраторных двигателей на экономически выгодной обедненной смеси советские ученые А. С. Соколик и А. Н. Войнов, работавшие под руководством академика Н. Н. Семенова, еще в 1937 г. предложили увеличить мощность источника зажигания: вместо искры в цилиндр направить факел пламени. Отсюда и происхождение названия нового способа зажигания — факельное. Одно из устройств факельного зажигания — небольшая (объемом в несколько кубических сантиметров) запальная камера, питаемая обогащенной бензино-воздушной смесью. Камера имеет свечу зажигания и одно-два отверстия с клапанами, соединяющими ее с цилиндром. Маленькую камеру называют форкамерой, а двигатель с такой камерой — форкамерным двигателем.

При воспламенении рабочей смеси в форкамере температура и давление в ней резко повышаются и струи пламени (факел) направляются в цилиндр двигателя. Такой более мощный, чем искра, запал обеспечивает практически полное сгорание обедненной рабочей смеси в цилиндрах двигателя.

Введение в эксплуатацию двигателей с факельным зажиганием повышает экономичность бензиновых двигателей внутреннего сгорания и значительно уменьшает загрязнение воздуха продуктами неполного сгорания бензина (в частности, оксидом углерода (II)), выбрасываемыми с выхлопными газами. Такие двигатели установлены на последней модели автомобиля «Волга» ГАЗ-31.

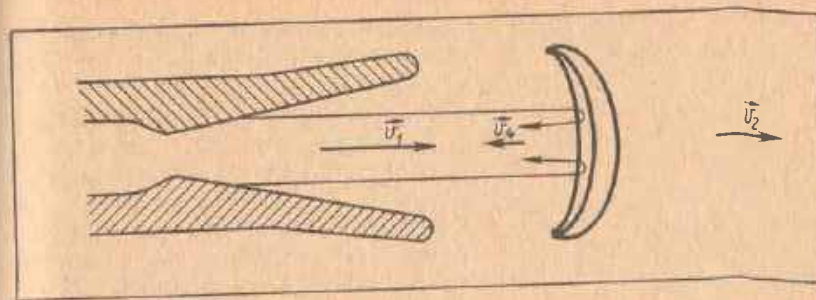


Рис. 71

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

Выясним, при каком соотношении скорости v_1 струи газа и линейной скорости v_2 лопатки турбины произойдет наиболее полная передача кинетической энергии струи газа лопатке турбины (рис. 71). При полной передаче кинетической энергии пара лопатке турбины скорость струи относительно Земли должна быть равна нулю, т. е. $v_4 = 0$.

В системе отсчета, движущейся со скоростью 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 Лава-

лем в 1889 г. Ее мощность была меньше 4 кВт при частоте вращения 30 000 об/мин.

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 *охладителе-конденсаторе*, а теплая вода направляется в *котел*.

Цикл паротурбинной установки в координатах $p - V$ показан на рисунке 72. В котле рабочее тело получает количество теплоты Q_1 , нагревается и расширяется при постоянном давлении (изобара AB). В турбине пар адиабатно расширяется (адиабата BC), совершая работу по вращению ротора. В конденсаторе-охладителе, омываемом, например, речной водой, пар отдает воде количество теплоты 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 $ABCD$.

Современные паровые турбины обладают высоким КПД

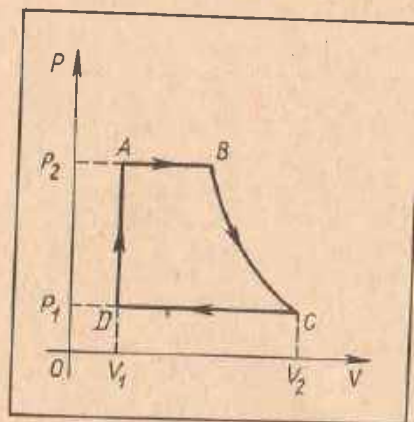


Рис. 72

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 $T_1 = 853 \text{ К}$), а температура пара на выходе из турбины обычно не ниже 30 °С (температура холодильника $T_2 = 303 \text{ К}$), максимальное значение КПД паротурбинной установки как тепловой машины равно:

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

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

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. 73). Компрессор состоит из ротора, укрепленного на одной оси с турбиной, и неподвижного направляющего аппарата.

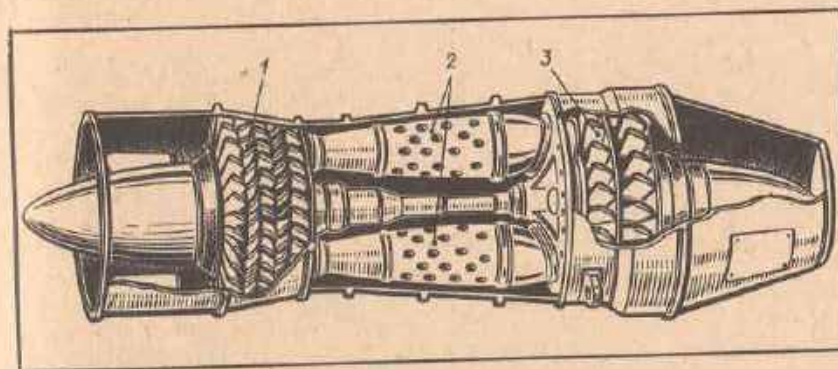


Рис. 73

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 адиабатно, поэтому температура воздуха значительно повышается, достигая 200°C и более.

Сжатый воздух поступает в камеру сгорания (рис. 74). Одновременно через форсунку в нее впрыскивается под большим давлением жидкое топливо — керосин, мазут.

При горении топлива воздух, служащий рабочим телом, получает некоторое количество теплоты и нагревается до температуры $1500\text{--}2200^{\circ}\text{C}$. 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 сгорания нагнетается с помощью компрессора значительно больше воздуха, чем необходимо для полного сжигания топлива. Воздух, входящий в камеру сгорания за зоной горения топлива, снижает

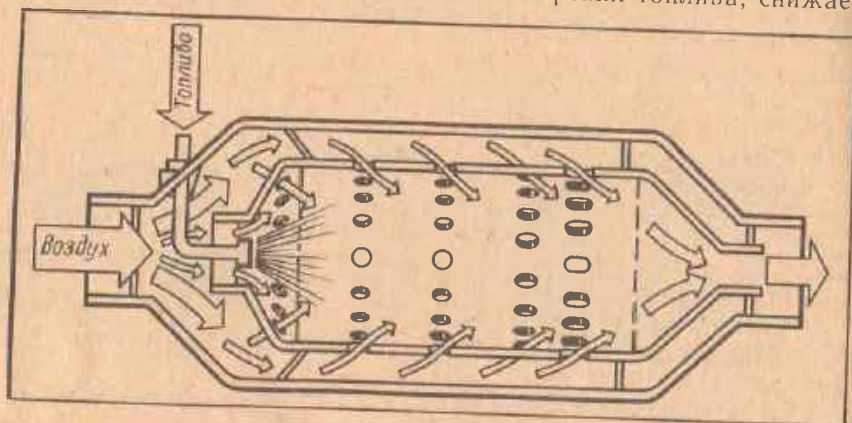


Рис. 74

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 перед турбиной температура газа достигает 1330°C .

Отработавший воздух вместе с продуктами сгорания при давлении, близком к атмосферному, и температуре более 500°C 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 75. Процессу сжатия воздуха в компрессоре соответствует адиабата AB , процессу нагревания и расширения в камере сгорания — изобара BC . Адиабатный процесс расширения горячего газа в турбине представлен участком CD , процесс охлаждения и уменьшения объема рабочего тела — изобарой DA .

КПД газотурбинных установок достигает 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 вдвое 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 быстротходность 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 Ил-18, Ан-22 — «Антей».

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

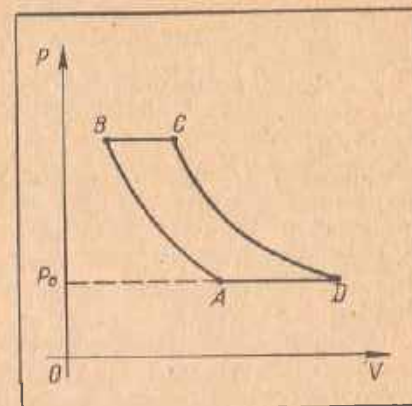


Рис. 75

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 устанавливают на большегрузных автомобилях.

Турбореактивный двигатель. 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. Турбореактивными двигателями оборудованы известные всему миру самолеты Ил-62, Ту-154, Ил-86.

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% при малых скоростях и до 70% при больших скоростях полета. Форсажными камерами позади турбины обычно оборудуют реактивные двигатели истребителей.

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. 76).

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 закону Бернулли

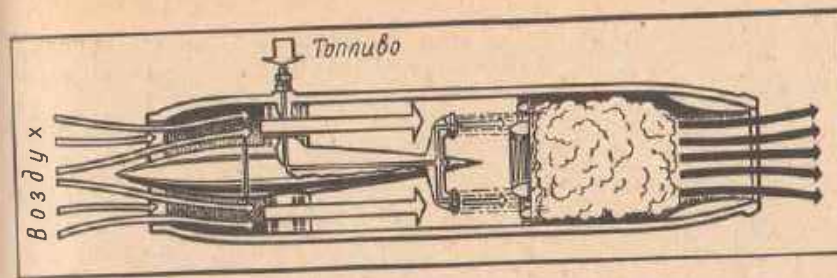


Рис. 76

в том участке трубы, где скорость движения газа меньше, давление выше.

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 на выходе из двигателя значительно превышает по модулю скорость движения самолета относительно воздуха v_1 .

Так как скорость воздуха относительно движения самолета относительно воздуха равна скорости 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 модулю, но противоположную по направлению. Это изменение импульса самолета вызывается реактивной силой отдачи газовой струи. Реактивные двигатели рассмотренного типа называют *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. Этому недостатка не имеет пульсирующий воздушно-реактивный двигатель.

Пульсирующий воздушно-реактивный двигатель. Главное отличие пульсирующего воздушно-реактивного двигателя от прямоточного — применение специальных клапанов в камере сгорания со стороны входа воздуха (рис. 77). 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,

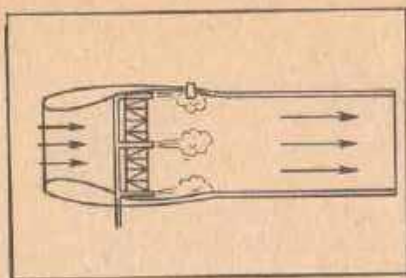


Рис. 77



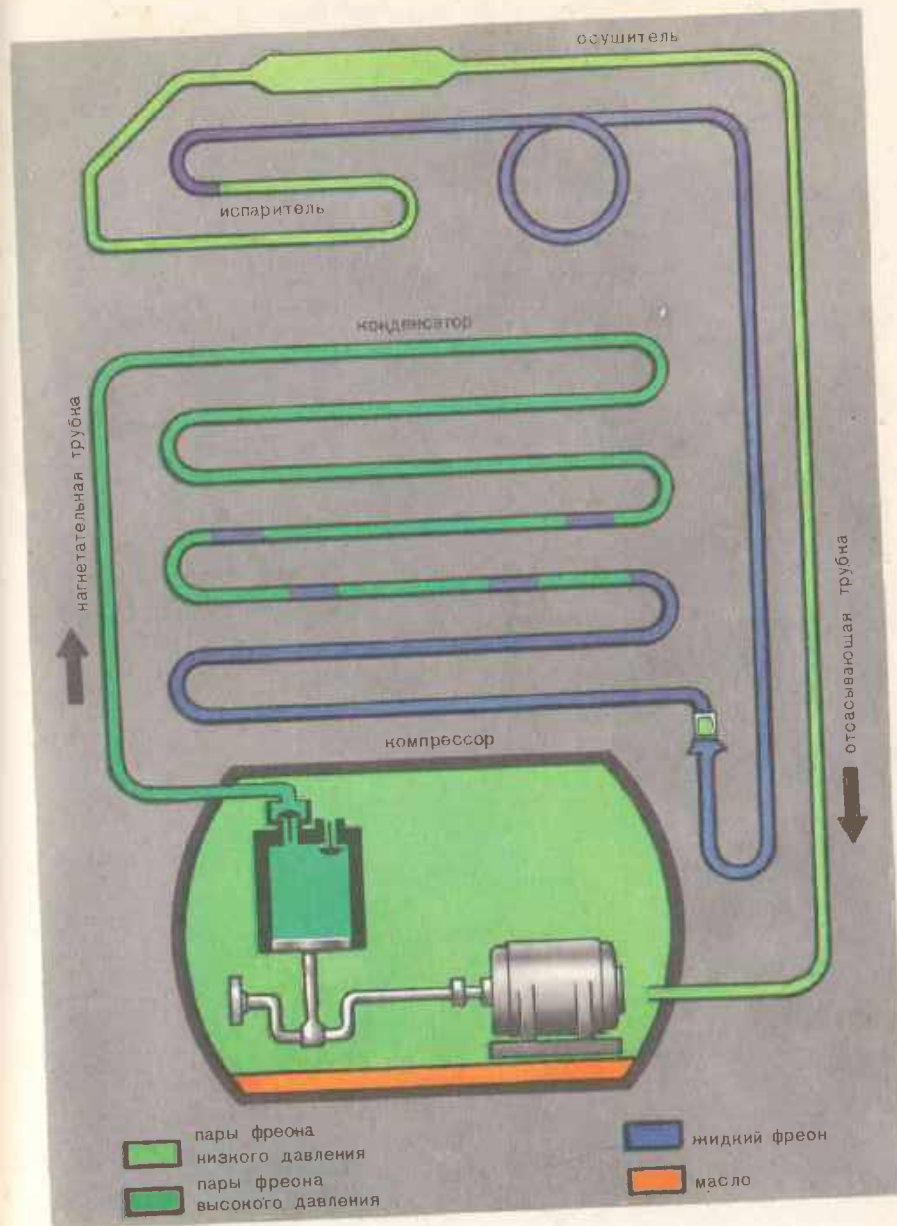
Рис. 78

Ракетные двигатели. Реактивные двигатели, не использующие для своей работы окружающую среду, например воздух земной атмосферы, называют 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 применяют 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.

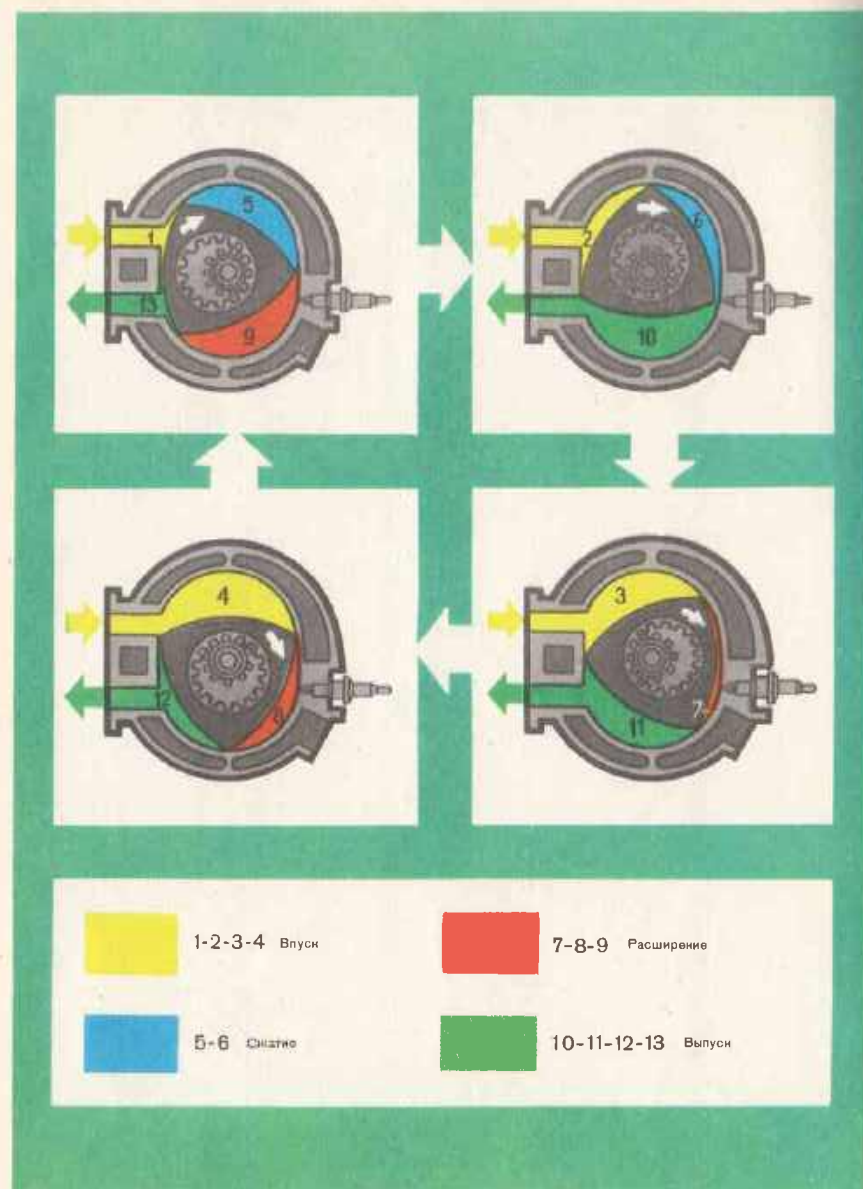
Наиболее просто устроены ракетные двигатели, работающие на твердом топливе (РДТТ) (рис. 78). Примером твердого ракетного топлива может служить порох. РДТТ находят применение в военной технике. Ракетные снаряды с РДТТ успешно применяли в годы Великой Отечественной войны на реактивных установках — «катюшах» (рис. 79).

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

клапаны со стороны воздухозаборника в это время закрыты. Расширение нагретого воздуха и продуктов горения приводит к выбросу струи горячих газов через открытое сопло 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 открыванию 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.



1. Схема устройства компрессионного холодильника



II. Схема работы двигателя Ванкеля



Рис. 79

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 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. 80), проанализировал возможности использования различных химических веществ в качестве горючего и окислителей, рассмотрел способы управления полетом ракеты:

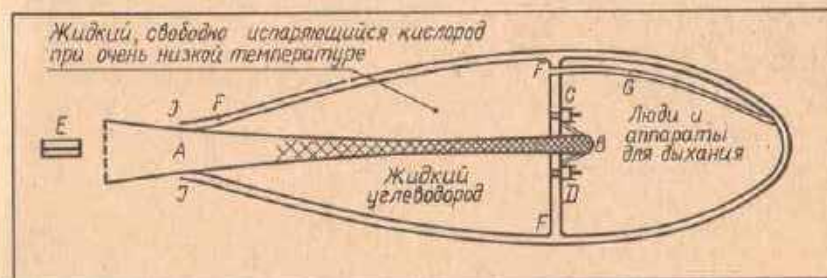


Рис. 80



С. П. Королев



В. П. Глушко

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.

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. 81) достигала 15 млн. кВт! Ракета-носитель «Протон», выведившая в космическое пространство советские ИСЗ «Протон» с массой 12,2 т, имела мощность около 45 млн. кВт! Двигатели этой космической ракеты развивают мощность, в 7 раз превосходящую мощность крупнейшей в мире Красноярской гидроэлектростанции им. 50-летия СССР!

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

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

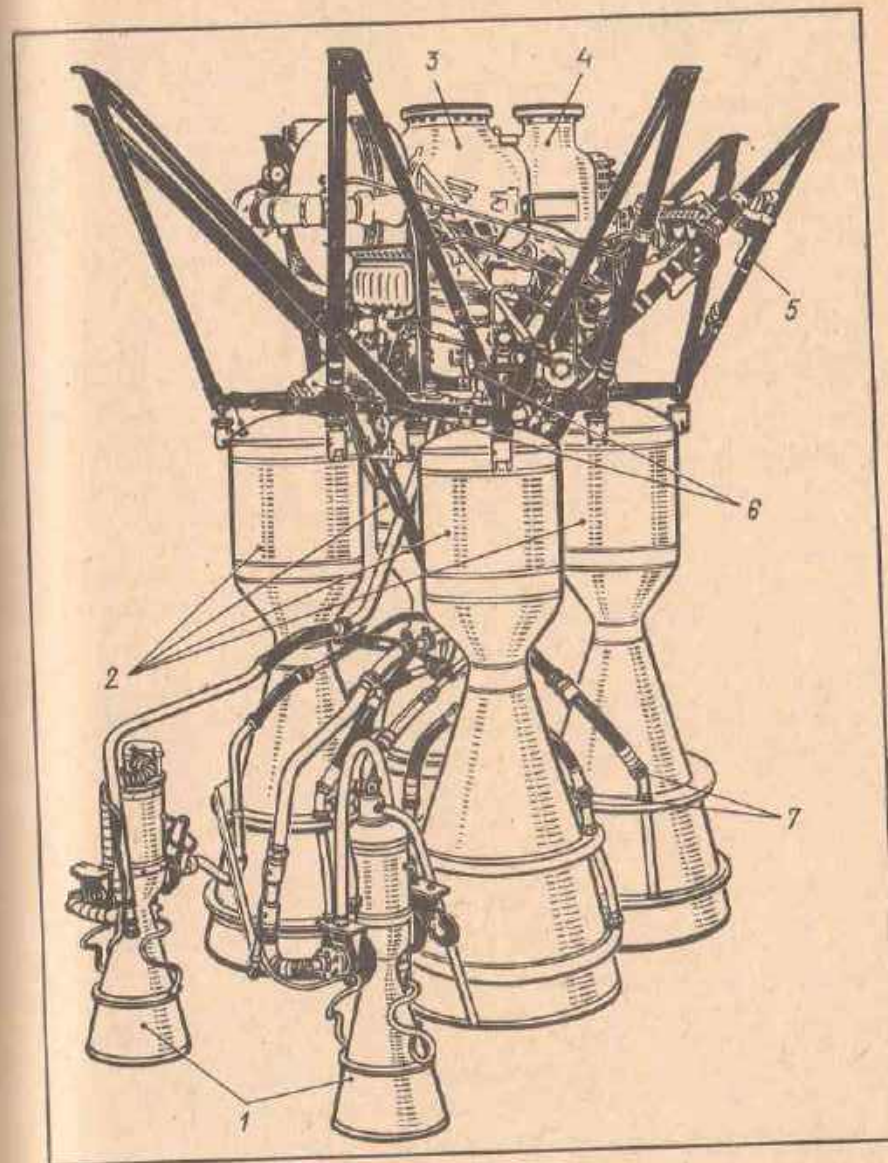


Рис. 81. Ракетный двигатель РД-107:

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

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 :

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

Отсюда

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

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

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

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 — удельная теплота сгорания 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 удельная теплота сгорания q горючего должна определяться как отношение количества теплоты Q к массе горючего и необходимого количества окислителя: $q = \frac{Q}{m}$.

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

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

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 ракетной энергии, определяемой 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.

- ?
- Как была устроена первая паровая машина И. И. Ползунова?
 - Почему паровые машины вытеснены двигателями внутреннего сгорания?
 - Как работает четырехтактный двигатель внутреннего сгорания?
 - Для чего в цилиндр двигателя внутреннего сгорания впускается воздух?
 - По какому циклу работает дизельный двигатель?
 - В чем преимущества дизельного двигателя перед карбюраторным?
 - Что такое факельное зажигание и для чего его используют в современных двигателях внутреннего сгорания?
 - В чем преимущества паровой турбины над поршневым паровым двигателем?
 - Где применяют газовые турбины?
 - В чем преимущества газовой турбины над паровой?
 - По какому циклу работает газовая турбина?
 - Где применяют газовые турбины?
 - Как устроен ракетный двигатель?
 - От чего зависит КПД ракетного двигателя?

§ 17. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

При всем разнообразии тепловых машин их объединяет одно общее качество: для работы они используют химическое горючее. Запасы каменного угля, нефти и газа на Земле велики, но не безграничны. Мировой уровень потребления энергии увеличивается вдвое примерно каждые 12 лет. При таких темпах роста потребления энергии разведанные запасы нефти и газа будут практически исчерпаны к концу текущего столетия, а на их долю в настоящее время приходится около 70% всего мирового производства энергии.

Основные пути решения энергетической проблемы человечества — поиск новых источников энергии, способных заменить химическое горючее (ядерная энергетика), и более широкое использование возобновимых источников энергии (энергии рек, ветра, сол-

вечной энергии). При обсуждении проблем энергетики может показаться, что создатели современных тепловых машин не заметили еще одной заманчивой возможности — создания машины, способной производить работу за счет поглощения тепла от окружающих тел.

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

$$\Delta U = Q = cm\Delta T = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot 10^{21} \text{ кг} \cdot 1 \text{ К} = 4,2 \cdot 10^{24} \text{ Дж}.$$

Насколько это число велико, говорит сравнение его с уровнем потребления энергии во всем мире за год, составляющим примерно $3 \cdot 10^{20}$ Дж.

Сравнив эти цифры, мы видим, что понижение температуры Мирового океана всего на 1 К обеспечило бы все человечество энергией при современном уровне ее потребления на 14 000 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, чтобы часть энергии теплового движения молекул воды Мирового океана превратилась 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 закроем 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 изобарное 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.

Второй закон термодинамики. Возможность создания такой машины, называемой «вечным двигателем второго рода», не противоречит первому закону 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.

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 превращение 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 которой 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 возмож-

но 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 взаимодвижения отдадут избыточную энергию тепловому движению, 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.

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

Случайные события. Действие таких случайных факторов, как различные скорости сталкивающихся молекул газа, различный угол столкновения их друг с другом, приводит к тому, что после каждого соударения молекула то ускоряет, то замедляет движение, при этом еще каждый раз изменяет направление вектора скорости. В результате движение молекул приобретает хаотический характер. Особенность хаотического движения в том, что практически невозможно определить заранее место нахождения молекулы и какую скорость она будет иметь. В этом существенное отличие теплового движения от механического.

Действие случайных факторов не позволяет предсказать дальнейшее поведение отдельной молекулы, но совместное действие случайных факторов проявляется в определенных закономерностях поведения большого числа молекул, т. е. газа в целом. Такие свойства газов, как неограниченное расширение до заполнения всего предоставленного объема, явление диффузии и другие, можно объяснить, исходя из рассмотрения совместного действия постоянных и случайных факторов. Для понимания сущности этих явлений и правильного их объяснения необходимо познакомиться с понятием вероятности события.

Вероятность события. В быту вероятность события определяется на основании субъективной оценки каких-либо известных данному человеку факторов. Поэтому вероятность этого же события с точки зрения другого человека может оказаться иной. Научное определение вероятности объективно. Оно выражается числом, не зависящим от того, кто его определяет.

Например, если много раз бросать кубик с цифрами (очками) 1, 2, 3, 4, 5, 6 на шести его гранях, то он будет падать на различные грани. Процесс падения кубика совершается каждый раз под действием силы тяжести. Выпадение же кубика на определенную грань, помеченную какой-то определенной цифрой, обусловлено

действием других, каждый раз меняющихся и не поддающихся учету причин: различными начальными положениями кубика, условиями его отпуска и т. д. Здесь случайный характер события связан с наличием не поддающихся учету причинно-следственных связей.

События, которые невозможно точно предсказать, называют случайными событиями. Частотой появления события называют отношение числа его наблюдений (число благоприятных событий n) к числу всех возможных событий N .

Опыт показывает, что при достаточно большом числе N возможных событий частота появления событий $\frac{n}{N}$ практически постоянна. Например, если кубик подбрасывать $N = 600$ раз, частота выпадения одной из шести цифр на гранях всегда примерно равна $\frac{100}{600} = \frac{1}{6}$. Отклонения в ту или иную сторону тем меньше, чем больше общее число бросаний.

Предел, к которому стремится частота n/N появления события при бесконечном увеличении числа N ,

$$\omega = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n}{N} =$$

называют **вероятностью события**.

Вероятность достоверного события, т. е. такого, которое произойдет обязательно, равна единице.

Вместо многократного повторения одного и того же опыта можно, например, осуществить одно бросание большого числа N одинаковых кубиков с пронумерованными гранями. И если подчитать, сколько кубиков n упало так, что выпала, например, цифра 5, то отношение $\frac{n}{N}$ будет по-прежнему близко к $1/6$.

Еще раз подчеркнем, что полученные выводы справедливы при массовости случайных явлений. При малом числе N частота появления события может существенно отличаться от вероятности события. Только при условии соблюдения массовости событий существует закономерность появления события с частотой, близкой к вероятности. Эту закономерность принято называть **статистической закономерностью**.

Направление физических процессов. При соприкосновении тел процесс теплопередачи происходит самопроизвольно от горячего тела к холодному до тех пор, пока оба тела не будут иметь одинаковые температуры. Все наблюдали, как налитый в чашку горячий чай постепенно остывает, нагревая окружающий воздух. Но никто не видел, чтобы теплый чай в чашке вдруг закипел за счет охлаждения окружающего его воздуха.

Каждый наблюдал распространение запаха духов при открывании флакона. Никто не наблюдал, чтобы молекулы веществ, вылетевшие из флакона с духами и разлетевшиеся по комнате, снова сами собой вернулись в открытый флакон. Процессы тепло-

передачи и диффузии самопроизвольно осуществляются только в одном направлении, поэтому их называют необратимыми процессами.

Рассмотрим в качестве примера, как с точки зрения понятия вероятности случайного события объясняется необратимость процесса расширения газа в вакуум.

Пусть в сосуде, мысленно разделенном перегородкой на две половины, находятся две молекулы газа a и b . В результате хаотического движения обе молекулы могут оказаться либо в одной половине сосуда, либо в другой, или же они распределятся по одной в каждой половине сосуда. Возможны четыре варианта размещения молекул по объему, т. е. $N = 2^2$. Размещения по одной молекуле в половинах сосуда реализуется двумя способами ($n = 2$) из четырех возможных ($N = 4$), вероятность этого события равна $\omega = \frac{2}{4} = \frac{1}{2}$. Вероятность же того, что обе молекулы будут находиться в одной половине сосуда, а вторая половина сосуда будет

пустой, также равна $1/2: \omega = \frac{2}{2^2} = \frac{1}{2}$. Мы получили, что вероятность равномерного распределения двух молекул равна вероятности сосредоточения их в одной половине сосуда.

Для нахождения всех возможных распределений из трех молекул нужно добавить одну молекулу в сосуд. Она может быть помещена в каждом случае или в правый, или в левый сосуд. Таким образом, число возможных размещений трех молекул в двух сосудах будет в два раза больше, чем из двух молекул, т. е. $N = 2^3 = 8$. Для четырех молекул число возможных размещений должно быть равно $N = 2^4 = 16$ и т. д., для n молекул

$$N = 2^n.$$

Возможные распределения четырех молекул по двум половинам сосуда представлены в таблице 3.

Таблица 3

Размещение	Первая половина	Вторая половина	Размещение	Первая половина	Вторая половина
1	$a b c d$	0	9	c	$a b d$
2	0	$a b c d$	10	a	$b c d$
3	$a b c$	d	11	$a b$	$c d$
4	$a c d$	b	12	$c d$	$a b$
5	$a b d$	c	13	$a c$	$b d$
6	$b c d$	a	14	$b d$	$a c$
7	d	$a b c$	15	$a d$	$c b$
8	b	$a c d$	16	$b c$	$a d$

Из таблицы видно, что распределение, при котором в каждой половине сосуда находится по две молекулы, реализуется шестью

способами (см. размещения 11—16) из шестнадцати возможных. Значит, вероятность равномерного распределения равна

$\omega = \frac{6}{16} \approx 0,38$, а вероятность распределения, соответствующего самопроизвольному сжатию газа в одну половину сосуда (см. размещения 1, 2), равна $\frac{2}{16} \approx 0,13$, т. е. в три раза меньше вероятности равномерного распределения.

С увеличением числа молекул увеличивается и число их возможных размещений по объему, соответственно уменьшается вероятность самопроизвольного сжатия газа, а вероятность равномерного распределения его частиц по обеим половинам сосуда увеличивается.

Для числа молекул, содержащихся в 1 см^3 газа при температуре 0°C и нормальном атмосферном давлении (т. е. $2,7 \cdot 10^{19}$), число возможных способов распределения по двум половинам сосуда равно $2^{2,7 \cdot 10^{19}}$, а вероятность того, что все молекулы соберутся в одной из двух половин сосуда, равна:

$$\omega = \frac{n}{N} = \frac{2}{2^{2,7 \cdot 10^{19}}}.$$

Эта вероятность настолько мала, что такое событие можно считать практически неосуществимым, а такие распределения, при которых в каждой половине сосуда имеется примерно одинаковое число молекул, являются наиболее вероятными, осуществимыми наибольшим числом способов.

Таким образом, необратимость расширения газа в вакуум носит вероятностный характер. Необратимость этого процесса обусловлена тем, что равномерное распределение молекул по объему является наиболее вероятным. Самопроизвольное сжатие газа в принципе возможно, но вероятность его исчезающе мала при большом числе молекул.

Аналогичное объяснение можно дать и наблюдаемому на опыте направлению теплопередачи. Всегда осуществляется передача тепла от горячего тела к холодному потому, что равномерное распределение быстрых и медленных молекул в двух соприкасающихся телах является более вероятным, чем такое распределение, при котором в одном теле будут только «быстрые» молекулы, а в другом — только «медленные».

Системы, состоящие из большого числа частиц, будучи представленные самим себе, самопроизвольно переходят из состояний менее вероятных в состояния более вероятные.

? В чем смысл второго закона термодинамики?

Чем отличается вечный двигатель первого рода от вечного двигателя второго рода?

Какие события называют случайными?

Что называют вероятностью случайного события?

Каков вероятностный смысл второго закона термодинамики?

Холодильник. Не опровергает ли второй закон термодинамики работа холодильника? Действие его как раз заключается в том, что от более холодного тела, находящегося в морозильнике, отнимается некоторое количество теплоты 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 холодильного шкафа.

Работа холодильника совершается не в противоречие второму закону термодинамики, а в полном соответствии с ним. Холодильник и воздух комнаты не составляют замкнутой системы. Холодильник необходимо подключить к электрической сети. Электрическая энергия с помощью электродвигателя превращается в механическую энергию, затем механическая энергия в результате работы компрессора холодильника 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.

Рабочим телом в домашнем компрессионном холодильнике (цветная вклейка 1) 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, откуда 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 из конденсатора в испаритель через капиллярную трубку давление паров фреона в испарителе будет тем ниже, чем дольше работает ком-

прессор. 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.

Рабочий цикл холодильной машины. Некоторые тепловые машины можно с помощью другого двигателя, например электромотора, заставить совершать цикл в обратном направлении. В обратных процессах (циклах) холодильником, хотя оно теперь отдает тепло, а нагревателем — тело, имеющее более высокую температуру, хотя теперь оно его получает. При этом рабочее тело будет получать за один цикл от холодильника количество теплоты Q_2 , отдавая нагревателю количество теплоты Q_1 , которое больше Q_2 на величину работы A , совершаемой электромотором:

$$Q_1 = Q_2 + A.$$

Можно сказать, что в данном случае тепловая машина производит отрицательную работу: $Q_2 - Q_1 = -A$.

В результате проведения обратного цикла увеличивается разность температур между нагревателем и холодильником. В этих условиях тепловая машина работает как «тепловой насос». За счет работы, совершаемой электромотором, машина переносит количество теплоты Q_2 от холодного тела к горячему.

Важнейшей характеристикой холодильной машины является холодильный коэффициент, равный

$$\epsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}.$$

Холодильный коэффициент показывает, какое количество теплоты отнимается от охлаждаемого тела при совершении единицы работы.

В идеальной холодильной машине максимальное значение холодильного коэффициента может быть равно

$$\epsilon = \frac{T_1}{T_1 - T_2},$$

в реальных машинах —

$$\epsilon < \frac{T_1}{T_1 - T_2}.$$

Другая важная характеристика холодильной машины — холодильная производительность, показывающая, какое количество теплоты q способна отнимать машина у охлаждаемых тел в единицу времени:

$$q = \frac{Q_2}{t}.$$

Получение и применение низких температур. Низкие температуры широко применяют не только для хранения продуктов в быту и пищевой промышленности, но и в медицине, в строительстве, в химической промышленности, в современной промышленной технологии. Искусственный холод применяют при проходке туннелей и строительстве шахт для замораживания водоносных пород, при создании искусственных катков на стадионах, при производстве синтетического каучука, искусственного волокна. Глубокое охлаждение (ниже -100°C) используют в медицине для длительного хранения крови, в машиностроении для охлаждения внутренних частей машин, которые при сборке должны быть плотно пригнаны к наружным.

Одно из наиболее важных применений глубокого охлаждения — сжижение воздуха для получения из него газообразных азота ($t_{\text{ж}} = -196^{\circ}\text{C}$) и кислорода ($t_{\text{ж}} = -183^{\circ}\text{C}$). Азот используют для производства аммиака, из которого получают различные удобрения, взрывчатые вещества, красители.

Кислород применяют для интенсификации окислительных процессов и получения высоких температур в автогенной сварке и резке металлов (температура пламени около 3200°C), в реактивных двигателях, для изготовления взрывчатых веществ — окислителей, — пропитанных жидким кислородом и содержащих много углерода, пористых веществ — угольная пыль, вата, опилки и т. п., взрываемых посредством детонатора. Окислители, применяемые в горном деле, удобны при транспортировке, так как составляющие их части порознь не взрывоопасны.

Применение кислородного дутья при выплавке стали в мартенах и конверторах снижает расход топлива и повышает производительность агрегата за счет ускорения процессов. Например, обогащение кислородом воздуха всего на 1% увеличивает производительность домы на 10%.

Применение сверхглубокого охлаждения, достигаемого с помощью жидкого гелия ($T_{\text{ж}} = 4,19\text{ K}$, а при понижении давления — $T_{\text{ж}} = 0,72\text{ K}$), позволяет создавать электромагниты со сверхпроводящими обмотками.

Машина Линде. Для получения низких температур можно не пользоваться адиабатное расширение сжатого воздуха после прохождения его через отверстие малого диаметра, называемое *дресселем*. Резкое падение давления сопровождается увеличением расстояний между молекулами. При этом совершается внутренняя работа газа против сил молекулярного притяжения. В результате потенциальная энергия взаимодействия молекул увеличивается за счет уменьшения кинетической энергии их хаотического движения. Внутренняя энергия газа уменьшается, температура его понижается. Этот процесс называют *адиабатным дресселированием*, а понижение температуры в этом процессе — эффектом Джоуля — Томсона.

В машине Линде для получения жидкого воздуха воздух сжи-

мают компрессором до давления 10^7 Па (100 ат). После охлаждения в теплообменнике сжатый воздух поступает в змеевик 1 (рис. 82), состоящий из труб, расположенных одна в другой. При выходе сквозь дрессель внутренней трубы 2 воздух резко расширяется и его температура понижается.

Охлажденный воздух идет по внешней трубе навстречу воздуху, идущему по внутренней трубе. В результате теплообмена температура воздуха, идущего по внутренней трубе, понижается. Через несколько часов работы установки температура воздуха понижается настолько, что начинается его конденсация. Жидкий воздух собирается в дьюаровском сосуде 3.

Турбодетандер. В современных холодильных машинах сжатый газ охлаждается не только вследствие расширения, но и за счет совершения внешней работы. Для этого предварительно сжатый и охлажденный до исходного состояния воздух направляется в специальную машину — детандер. Первоначально детандеры были поршневыми, похожими на паровую машину, но работающую не на паре, а на сжатом воздухе. Из-за необходимости сжимать воздух до сотен тысяч паскалей установки были очень громоздкими. Многоступенчатый компрессор был очень велик и сложен.

Для устранения указанных недостатков детандера (смазка, высокие давления) еще в начале XX в. были сделаны попытки заменить поршневые детандеры турбинными. На вращение турбины и преодоление умышленно создаваемого трения расходуется энергия газа, и он охлаждается. Недостатком таких машин был низкий их КПД.

Как заметил академик П. Л. Капица, это было вызвано просчетом конструкторов, не учитывавших, что сильно сжатый и охлажденный воздух по своим свойствам ближе к жидкости, чем к пару. В 1939 г. Петр Леонидович Капица разработал турбодетандер с активной турбиной, близкой по конструкции к водяной, а не к паровой. Турбина делает 41000 об/мин, поэтому забирает у газа большое количество энергии и эффективно его охлаждает.

Схема устройства первого турбодетандера П. Л. Капицы при-

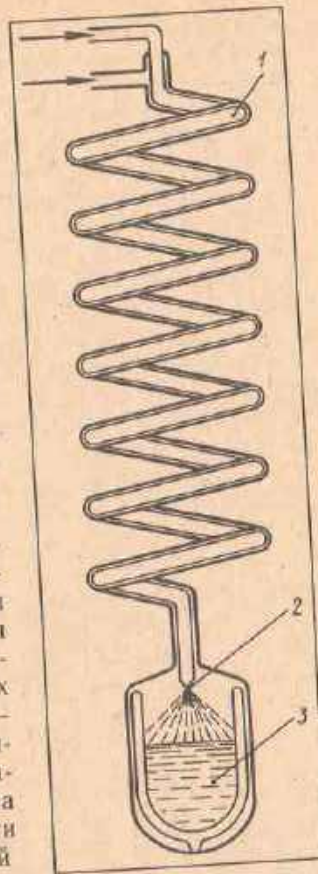


Рис. 82

ведена на рисунке 83. Внутри корпуса 3 имеется улиткообразный канал, в котором расположены направляющие сопла 4. Ротор 1 насажен на гибкий вал 5. Воздух из компрессора под давлением около $6 \cdot 10^5$ Па и уже охлажденный до -160°C входит в турбодетандер и соплами 4 направляется на лопатки 2 ротора 1. Ротор приходит во вращение. В направляющем аппарате и в роторе происходит расширение воздуха. Давление падает до $1,5 \cdot 10^5$ Па, а температура понижается до -187°C . Отработанный воздух выходит через центральное отверстие ротора. Для предотвращения утечки воздуха имеются лабиринтные уплотнения 6 ротора и вала.

На рисунке 84 изображена схема установки П. Л. Капицы с турбодетандером. Компрессор К сжимает воздух до давления $(5-6) \cdot 10^5$ Па. Сжатый воздух проходит через теплообменник Т, где предварительно охлаждается встречным потоком несжиженного воздуха. Далее поток разделяется на две части. Небольшая часть сжатого воздуха поступает непосредственно в конденсатор С, а основной поток поступает в турбодетандер Д. В турбодетандере сжатый воздух ударяется о лопасти турбины и, вращая последнюю, совершает работу. При этом его давление падает до атмосферного и температура снижается дополнительно на некоторую величину ΔT . Расширившийся и охлажденный воздух поступает в конденсатор С, поднимается по трубам вверх и затем

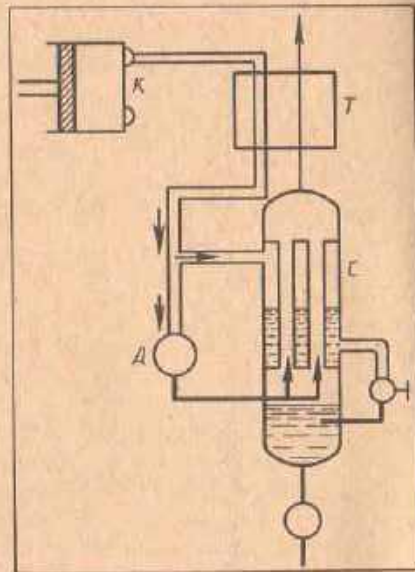
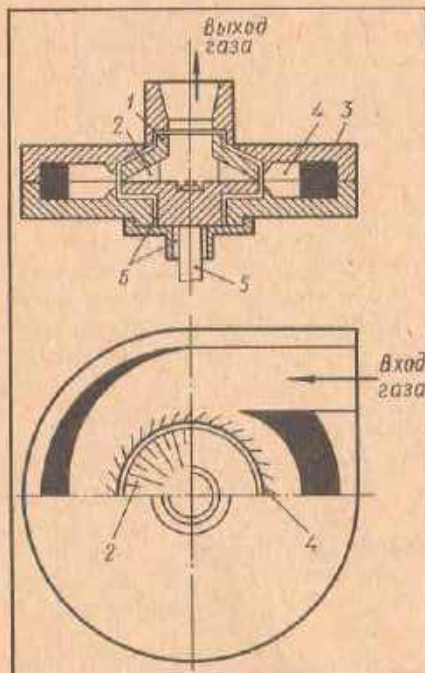


Рис. 83

Рис. 84

выходит через теплообменник Т наружу. Сжатый воздух, не прошедший через детандер, поступает в межтрубное пространство конденсатора, где охлаждается встречным потоком воздуха. При этом сжимается воздух в межтрубном пространстве. Жидкий воздух пропускается через дроссель в конденсатор. При уменьшении давления часть жидкого воздуха испаряется и поднимается вверх, а оставшаяся жидкость, отдав часть внутренней энергии на испарение, охлаждается до температуры, при которой давление насыщенных паров не превышает 10^5 Па.

Преимущество турбодетандера — применение более низких давлений и как следствие уменьшение габаритов установки. Турбодетандеры обладают высокой производительностью, их термодинамический КПД достигает 17%, а на получение жидкого воздуха массой 1 кг затрачивается энергия 1,1 кВт·ч. При одинаковой производительности размеры ожижительной установки с турбодетандером П. Л. Капицы в 5 раз меньше размеров аналогичных установок с поршневыми детандерами.

В турбодетандерах можно производить не только сжижение воздуха, но и водорода, гелия. Но для этого требуется более глубокое предварительное охлаждение газа.

Докажите, что работа холодильника не может служить опровержением второго закона термодинамики.

Как устроен домашний холодильник и каков принцип его действия?

Как получают жидкий воздух?

Где применяют жидкие азот и кислород?

§ 19. ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

Примеры решения задач

Пример 9. Вычислите работу, совершенную одним молем идеального газа при нагревании его на 1 К при постоянном давлении.

Решение

$$\begin{aligned} \nu &= 1 \text{ моль} \\ \Delta T &= 1 \text{ К} \\ p &= \text{const} \end{aligned}$$

$$A = ?$$

$$\begin{aligned} A &= p\Delta V; pV = \nu RT; \\ p\Delta V &= \nu R\Delta T; \\ A &= \nu R\Delta T. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{При } \nu &= 1 \text{ моль и } \Delta T = 1 \text{ К} \\ A &= R. \end{aligned}$$

Из последнего равенства следует, что при нагревании на 1 К при постоянном давлении 1 моль идеального газа ($\nu = 1$ моль) совершает работу, численно равную молярной газовой постоянной R .

Пример 10. Удельная теплоемкость кислорода при постоянном давлении равна $9,1 \cdot 10^2$ Дж/(кг·К). Определите удельную теплоемкость кислорода при постоянном объеме.

Решение

$$c_p = 9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$c_v = ?$$

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

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

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

$$c_v = c_p - \frac{m R \Delta T}{m M \Delta T} = c_p - \frac{R}{M};$$

$$c_v = 9,1 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} - \frac{8,31}{32 \cdot 10^{-3}} \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} =$$

$$= 6,5 \cdot 10^2 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Пример 11. В квартире объемом 100 м^3 на нагревание воздуха израсходовано количество теплоты 10^6 Дж . Определите изменение внутренней энергии воздуха в квартире. Начальная температура воздуха 20°C .

Решение. В задаче требуется определить увеличение внутренней энергии воздуха, находящегося в квартире. Часть воздуха при нагревании при постоянном давлении вышла из квартиры, и при расчете это изменение массы воздуха необходимо учитывать (квартира не герметична). 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:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{5}{2} k T_2 N_2 - \frac{5}{2} k T_1 N_1.$$

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

$$N_1 = \frac{m_1}{M} N_A; \quad m_1 = \frac{p V M}{R T_1};$$

$$N_1 = \frac{p V M N_A}{M R T_1} = \frac{p \tilde{V}}{k T_1};$$

$$U_1 = \frac{5}{2} k T_1 \frac{p V}{k T_1} = \frac{5}{2} p V.$$

Аналогично можно получить:

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

Следовательно, при постоянном объеме и давлении внутренняя энергия идеального газа остается постоянной при любых изменениях температуры газа. Этот парадоксальный результат является следствием того, что давление газа прямо пропорционально средней кинетической энергии молекул $\bar{\epsilon}$ и их концентрации n :

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

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. Качественно 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.

Пример 12. Одним из способов получения высоких температур является адиабатное 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 адиабатное сжатие газа в трубе. Вычислите максимальное нагревание водорода массой 2 г при сжатии, если пороховой заряд сообщает поршню массой 10 кг начальную скорость 1 км/с .

Решение

$$m = 10 \text{ кг}$$

$$m_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$M = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$v = 10^3 \text{ м/с}$$

$$\Delta T = ?$$

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

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

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

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

$$\Delta T = \frac{10 \text{ кг} \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}} \approx 2,4 \cdot 10^5 \text{ К}.$$

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.

Пример 13. В цилиндре тепловой машины заключен 1 моль одноатомного идеального газа. Определите КПД тепловой машины, если изменение состояния газа в цилиндре осуществляется по циклу, представленному на рисунке 85.

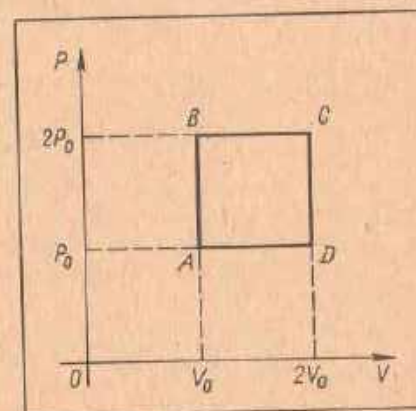


Рис. 85

Решение

$$\nu = 1 \text{ моль}$$

$$c_V = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$$

$$\eta = ?$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1};$$

$$Q_1 = Q_{AB} + Q_{BC} = mc_V (T_B - T_A) + mc_V (T_C - T_B) + 2p_0 V_0;$$

$$Q_2 = Q_{CD} + Q_{DA} = mc_V (T_C - T_D) + mc_V (T_D - T_A) + p_0 V_0;$$

$$\eta = \frac{mc_V (T_C - T_A) + 2p_0 V_0 - mc_V (T_C - T_A) - p_0 V_0}{mc_V (T_C - T_A) + 2p_0 V_0} = \frac{p_0 V_0}{mc_V (T_C - T_A) + 2p_0 V_0}.$$

Из уравнения Менделеева — Клапейрона для состояний А и В получим:

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_B V_B}{T_B}, \text{ или } \frac{p_0 V_0}{T_A} = \frac{2p_0 V_0}{T_B}.$$

Отсюда следует: $T_B = 2T_A$.

Для состояний В и С аналогично получим:

$$\frac{p_B V_B}{T_B} = \frac{p_C V_C}{T_C}, \quad \frac{2p_0 V_0}{T_B} = \frac{2p_0 V_0}{T_C},$$

$$T_C = 2T_B = 4T_A.$$

Обозначив $T_A = T_0$, подставим найденные значения T_B и T_C в выражение для КПД:

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{mc_V (4T_0 - T_0) + 2p_0 V_0}.$$

Так как $\nu = 1$ моль, $c_V = \frac{3}{2} \frac{R}{M}$ и $p_0 V_0 = RT_0$,

получаем:

$$\eta = \frac{p_0 V_0}{m \frac{3}{2} \frac{R}{M} \cdot 3T_0 + 2p_0 V_0} = \frac{p_0 V_0}{\frac{9}{2} p_0 V_0 + 2p_0 V_0} = \frac{2p_0 V_0}{13p_0 V_0} \approx 0,15.$$

Пример 14. На рисунке 86 представлены диаграммы двух циклов Карно: 1234 и 123'4'. При работе по какому из этих циклов тепловая машина будет обладать большим КПД?

Решение. Значение КПД идеальной тепловой машины определяется выражением

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

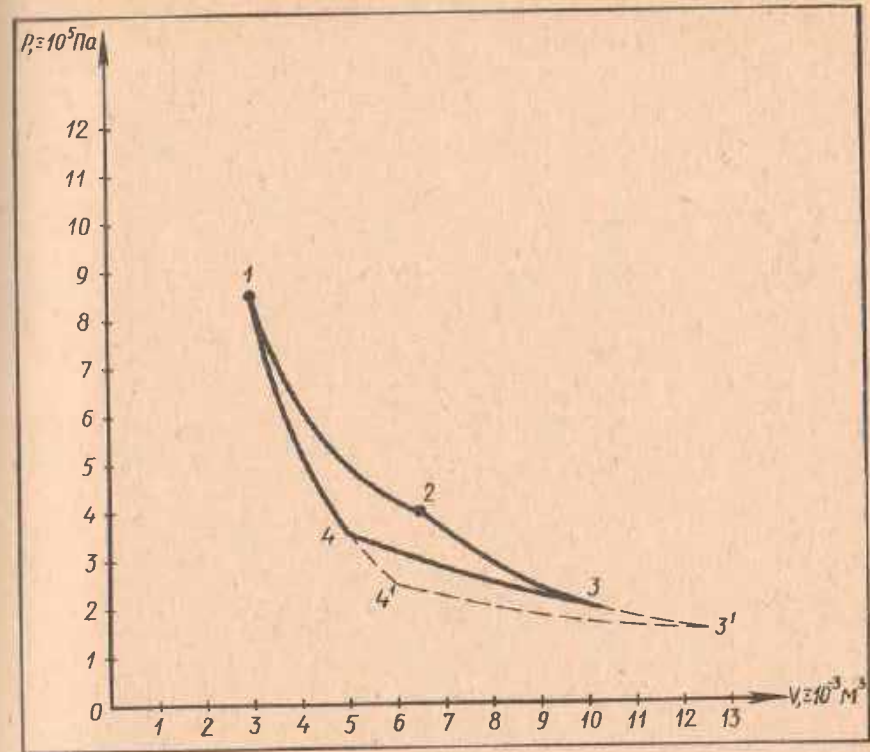


Рис. 86

Температура T_1 нагревателя в двух циклах одинакова, так как изотерма 1—2 у них общая. Температура холодильника T_2 при работе по циклу 123'4' ниже, так как адиабатное расширение газа происходит до большего объема. Следовательно, КПД при работе по циклу 123'4' выше, чем при работе по циклу 1234.

Пример 15. На рисунке 87 представлена диаграмма цикла, осуществленного с 0,2 моль одноатомного идеального газа. Участки BC и DA — адиабаты. Вычислите коэффициент полезного действия тепловой машины, работающей по этому циклу. Определите работу, совершенную газом на участке BC. Найдите максимальное значение КПД тепловой машины с использованием нагревателя и холодильника, с которыми осуществлен данный цикл, если в точке В газ находился в тепловом равновесии с нагревателем, а в точке D — в тепловом равновесии с холодильником.

Решение. Так как участки BC и DA являются адиабатами, то передача количества теплоты Q_1 от нагревателя осуществляется только при изохорном процессе A — B, а передача количества теплоты Q_2 холодильнику — только при изохорном процессе C — D.

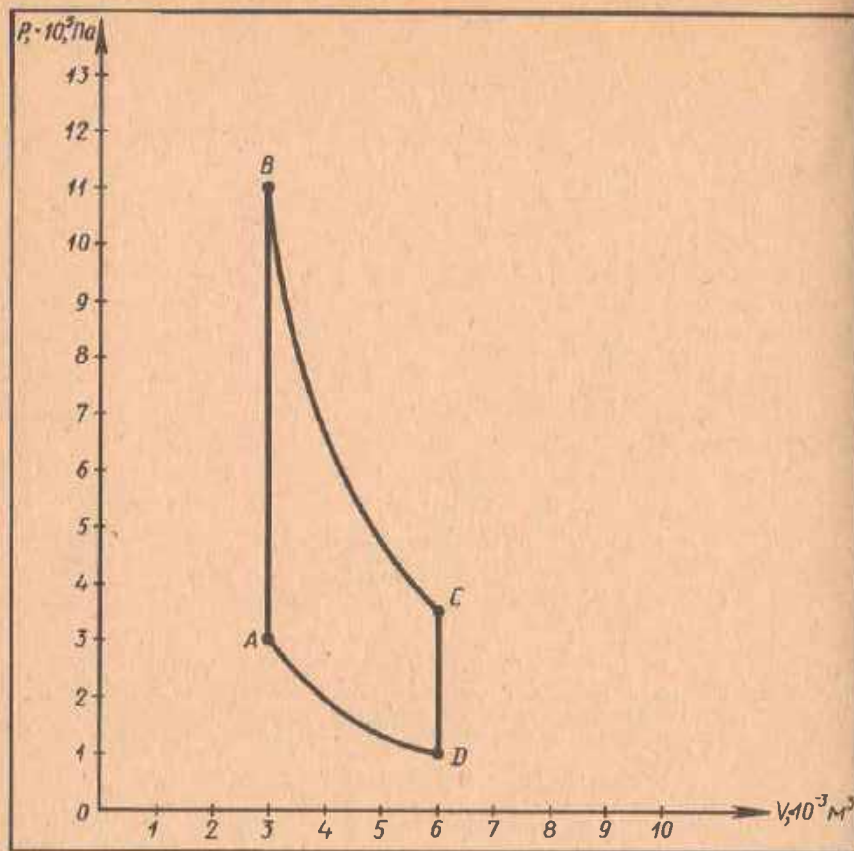


Рис. 87

При изохорных процессах работа равна нулю, поэтому из первого закона термодинамики следует:

$$Q_1 = \Delta U_1 \text{ и } Q_2 = \Delta U_2.$$

Изменение внутренней энергии ΔU идеального газа при изохорном процессе равно:

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T = \frac{3}{2} V \Delta p,$$

следовательно,

$$Q_1 = \frac{3}{2} V_A \Delta p_{AB}, \quad Q_2 = \frac{3}{2} V_C \Delta p_{CD}.$$

Работа A' , совершенная за цикл, равна:

$$A' = Q_1 - Q_2 = \frac{3}{2} (V_A \Delta p_{AB} - V_C \Delta p_{CD}).$$

КПД цикла равен:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{V_A \Delta p_{AB} - V_C \Delta p_{CD}}{V_A \Delta p_{AB}}.$$

Подставим числовые данные величин из диаграммы на рисунке 87:

$$\eta = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 8 \cdot 10^5 \text{ Па} - 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па}}{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 8 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 0,375.$$

Работа газа при адиабатном расширении из состояния B в состояние C равна изменению внутренней энергии газа с противоположным знаком:

$$A'_{BC} = -\Delta U_{BC}, \quad -\Delta U_{BC} = \frac{3}{2} \nu R (T_B - T_C).$$

Используя уравнение состояния идеального газа, найдем значения температуры в точках B и C:

$$T_B = \frac{p_B V_B}{\nu R},$$

$$T_C = \frac{p_C V_C}{\nu R},$$

$$T_B = \frac{11 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{0,2 \text{ моль} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}} = 1986 \text{ К};$$

$$T_C = \frac{3,5 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{0,2 \text{ моль} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}} = 1263 \text{ К};$$

$$T_B - T_C = 723 \text{ К},$$

$$A'_{BC} = \frac{3}{2} \cdot 0,2 \text{ моль} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot 723 \text{ К} \approx 1,8 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Максимальное значение КПД тепловой машины равно:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{T_B - T_D}{T_B}.$$

Найдем значение температуры в точке D:

$$T_D = \frac{p_D V_D}{\nu R}.$$

$$T_D = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ К}}{0,2 \text{ моль} \cdot 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}} = 361 \text{ К}.$$

Тогда

$$\eta_{\max} = \frac{1986 \text{ К} - 361 \text{ К}}{1986 \text{ К}} = 0,82.$$

Пример 16. Космический корабль массой 400 кг двигался вокруг Земли радиусом 6370 км по круговой орбите на высоте $h_1 = 200$ км от ее поверхности. В результате включения ракетного двигателя на короткое время Δt скорость космического корабля увеличилась на $\Delta V = 10$ м/с, а траектория движения стала

эллипсом с минимальным удалением от поверхности Земли $h_1 = 200$ км и максимальным удалением от поверхности Земли $h_2 = 234$ км. С какой скоростью v_2 движется космический корабль в точке максимального удаления от поверхности Земли? Чему равны сила тяги F ракетного двигателя, время Δt его работы, масса израсходованного топлива Δm ?

Изменением массы космического корабля пренебречь. Массу Земли M считать равной $6 \cdot 10^{24}$ кг, гравитационную постоянную $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², секундный расход топлива $m_c = \frac{\Delta m}{\Delta t} = 1$ кг/с, скорость истечения газов $v = 4000$ м/с, удельную теплоту сгорания горючего и окислителя $q = 1,2 \cdot 10^7$ Дж/кг.

Решение. Скорость v_1 космического корабля в точке минимального удаления от поверхности Земли равна:

$$v_1 = v_0 + \Delta v.$$

Скорость v_0 движения по круговой орбите можно найти из уравнения

$$\frac{mv_0^2}{2} = G \frac{Mm}{R_1^2},$$

где $R_1 = R + h_1 = 6,57 \cdot 10^6$ м, отсюда

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM}{R_1}}.$$

Подставив числовые значения, найдем:

$$v_0 = \sqrt{\frac{6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2 \cdot 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}}{6,57 \cdot 10^6 \text{ м}}} = 7,805 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

$$v_1 = 7,805 \cdot 10^3 \text{ м/с} + 10 \text{ м/с} = 7,815 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

По закону сохранения момента импульса для космического корабля выполняется равенство

$$mv_1 R_1 = mv_2 R_2,$$

поэтому скорость v_2 в точке максимального удаления равна:

$$v_2 = \frac{v_1 R_1}{R_2},$$

где $R_2 = R + h_2 = 6,604 \cdot 10^6$ м.

Подставив числовые значения, получим:

$$v_2 = \frac{7,815 \cdot 10^3 \text{ м/с} \cdot 6,570 \cdot 10^6 \text{ м}}{6,604 \cdot 10^6 \text{ м}} = 7,775 \cdot 10^3 \text{ м/с}.$$

Силу тяги F ракетного двигателя найдем из уравнения:

$$F \Delta t = \Delta m v,$$

где Δm — масса газов, выброшенных ракетным двигателем за

интервал времени Δt , v — скорость истечения газовой струи. Перепишем это уравнение в виде

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} v = m_c v.$$

Подставив числовые данные, найдем:

$$F = 1 \text{ кг/с} \cdot 4000 \text{ м/с} = 4 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Время работы двигателя можно найти по изменению импульса космического корабля:

$$F \Delta t = m \Delta v,$$

где m — масса космического корабля, Δv — изменение его скорости, т. е.

$$\Delta t = \frac{m \Delta v}{F}.$$

Подставив числовые значения, найдем:

$$\Delta t = \frac{4000 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}}{4000 \text{ Н}} = 10 \text{ с}.$$

Массу Δm израсходованного топлива и окислителя можно найти по закону сохранения импульса для системы «корабль — горючее»:

$$m \Delta v = \Delta m v,$$

отсюда

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

Подставив числовые данные, получим:

$$\Delta m = \frac{4000 \text{ кг} \cdot 10 \text{ м/с}}{400 \text{ м/с}} = 10 \text{ кг}.$$

Коэффициент полезного действия ракетного двигателя определяется выражением.

$$\eta = \frac{N}{Q_c},$$

где N — мощность двигателя, Q_c — мощность, выделяющаяся при сжигании топлива.

Так как $N = \frac{m_c v^2}{2}$, а $Q_c = m_c q$, КПД ракеты равен:

$$\eta = \frac{v^2}{2q} = \frac{(4 \cdot 10^3 \text{ м/с})^2}{2 \cdot 1,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}} = 0,67.$$

Существенно иной результат можно получить, если найти КПД ракетного двигателя как отношение изменения кинетической

энергии корабля к количеству теплоты, выделившейся при сжигании топлива:

$$\eta' = \frac{\Delta E_k}{Q}.$$

Изменение кинетической энергии корабля равно работе силы тяги на участке разгона:

$$\Delta E_k = FS = Fv_0\Delta t = m_c v v_0 \Delta t.$$

Отсюда КПД равен:

$$\eta' = \frac{m_c v v_0 \Delta t}{m_c q \Delta t} = \frac{v v_0}{q} = \frac{7,8 \cdot 10^3 \text{ м/с} \cdot 4 \cdot 10^3 \text{ м/с}}{1,2 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}} = 2,6.$$

Мы получили парадоксальный результат: КПД ракетного двигателя равен 260%! Никакой ошибки в расчетах здесь нет. Парадокс объясняется тем, что при работе двигателя в ракете, летящей с большой скоростью, часть кинетической энергии топлива, двигавшегося вместе с ракетой, передается ракете.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 20. В космическое пространство выброшена вода массой 1 кг при температуре 0 °С. Сколько воды превратится в лед в результате охлаждения при испарении?

Задача 21. Кастрюля-скороварка с водой нагрета до температуры 110 °С. Какая доля воды превратится в пар, если крышку кастрюли открыть сразу, без охлаждения кастрюли?

Задача 22. При переходе 1 моль идеального газа из состояния 1 с температурой T в состояние 3 с той же температурой газ совершил работу 8300 Дж (рис. 88). Определите температуру газа в состояниях 1 и 3.

Задача 23. Определите КПД замкнутого термодинамического цикла, представленного на рисунке 89.

Задача 24. Карбюраторный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу, изображенному на диаграмме $p - V$ (рис. 90), состоящему из двух адиабат (1—2), (3—4) и двух изохорных процессов (2—3), (1—4). Рассчитайте КПД дви-

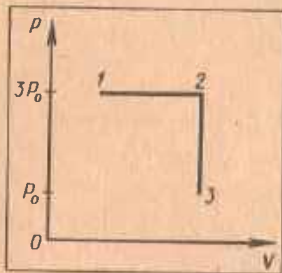


Рис. 88

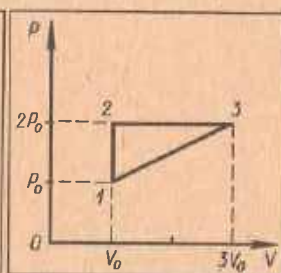


Рис. 89

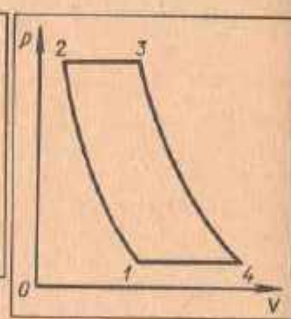


Рис. 90

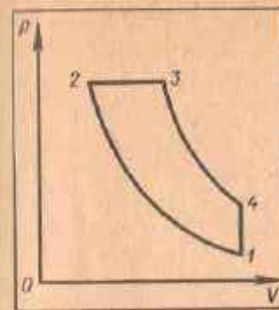


Рис. 91

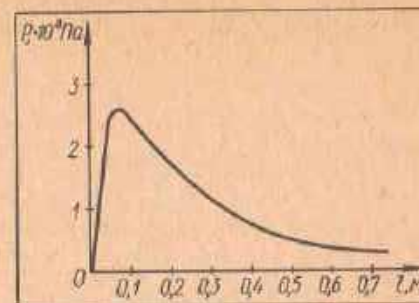


Рис. 92

гателя при следующих значениях температуры $T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 524 \text{ К}$, $T_3 = 786 \text{ К}$, $T_4 = 450 \text{ К}$.

Задача 25. Дизельный двигатель внутреннего сгорания работает по циклу, изображенному на диаграмме $p - V$ (рис. 91), состоящему из двух адиабат (1—2), (3—4), одной изобары (2—3) и одной изохоры (1—4). Рассчитайте КПД такого двигателя, если отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v равно $\frac{c_p}{c_v} = 1,4$, а температура газа равна

$T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 750 \text{ К}$, $T_3 = 1200 \text{ К}$, $T_4 = 600 \text{ К}$.

Задача 26. Используя график изменения давления пороховых газов при продвижении пули в стволе винтовки (рис. 92), определите КПД выстрела. Масса пороха 3,2 г, удельная теплота сгорания пороха $4,6 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$, площадь поперечного сечения пули $S = 0,5 \text{ см}^2$.

Задача 27. Газотурбинная установка работает по циклу, изображенному на диаграмме $p - V$ (рис. 93), состоящему из двух адиабат (1—2), (3—4) и двух изобар. Рассчитайте КПД такого двигателя, если температура газа равна: $T_1 = 300 \text{ К}$, $T_2 = 900 \text{ К}$, $T_3 = 1800 \text{ К}$.

Задача 28. Одноатомный газ, находящийся при постоянном давлении $p = 10^6 \text{ Па}$ в цилиндре под поршнем сечением $S = 60 \text{ см}^2$, нагревается так, что поршень перемещается на расстояние $l = 5 \text{ см}$. Найдите количество теплоты Q , сообщенное газу в этом процессе.

Задача 29. В идеальной тепловой машине газ отдал холодильнику 55% теплоты, полученной от нагревателя. Определите температуру T_2 холодильника, если температура нагревателя $T_1 = 600 \text{ К}$.

Задача 30. В вертикальном цилиндре высотой $h_0 = 2 \text{ м}$ с теплоизолированными стенками находится гелий массой $m = 0,32 \text{ г}$ при температуре $T = 27^\circ \text{С}$. На какой высоте h окончательно установится поршень массой $m_1 = 40 \text{ кг}$, опущенный сверху цилиндра и движущийся в нем без трения, если над поршнем вакуум?

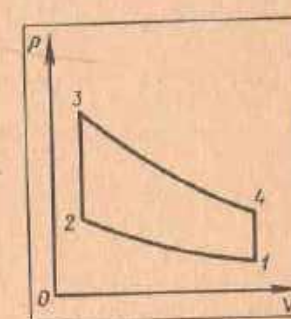


Рис. 93

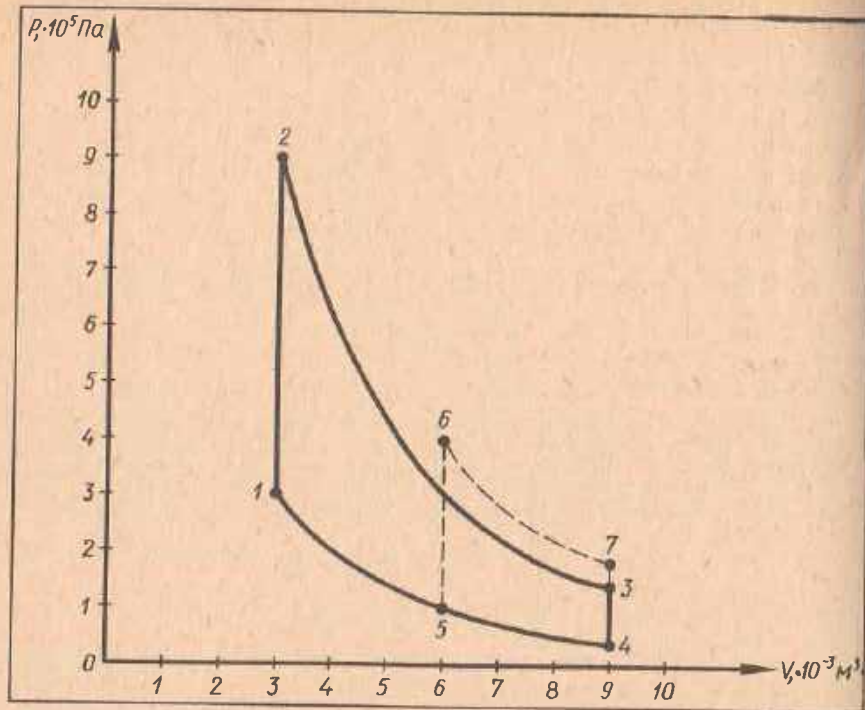


Рис. 94

Задача 31. На рисунке 94 приведены диаграммы двух циклов, каждый из которых состоит из двух изохор и двух адиабат. При работе по какому из этих двух циклов двигатель имеет более высокое значение КПД?

Задание для самопроверки 2

1. В калориметре, теплоемкостью стенок которого можно пренебречь, содержится вода массой 1 кг. При опускании в воду металла массой 1 кг в результате теплопередачи он охладился на 50 К, а вода нагрелась на 5 К. Чему равна удельная теплоемкость металла?

А. 0,1 Дж/(кг·К). Б. 10 Дж/(кг·К). В. 0,42 Дж/(кг·К). Г. 420 Дж/(кг·К). Д. 42000 Дж/(кг·К).

2. Какое количество теплоты необходимо передать одному молю идеального одноатомного газа, чтобы изохорно увеличить давление в 3 раза? Начальная температура газа T_0 .

А. $\frac{3}{2}RT_0$. Б. $2RT_0$. В. $\frac{5}{2}RT_0$. Г. $3RT_0$. Д. $\frac{9}{2}RT_0$.

3. Чему равно отношение $\frac{U_1}{U_2}$ внутренней энергии U_1 газообразного гелия к внутренней энергии U_2 газообразного неона при одинаковых значениях массы газа $m_1 = m_2$ и температуры

$T_1 = T_2$? Молярная масса гелия $M_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а молярная масса неона $M_2 = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

А. 0,2. Б. 5. В. 1. Г. 3. Д. 25/3.

4. В комнате в течение t с был включен нагреватель мощностью P , при этом температура воздуха повысилась на 2 К. Считая воздух идеальным двухатомным газом, определите, на сколько увеличилась внутренняя энергия воздуха в комнате при постоянном давлении. Масса воздуха m , его молярная масса равна M .

А. Pt Дж. Б. $2c_p m$ Дж. В. 0 Дж. Г. $\frac{3mR}{M}$ Дж. Д. $\frac{5mR}{M}$ Дж.

5. Какое количество теплоты нужно передать 1 моль идеального одноатомного газа, чтобы изобарно увеличить его объем вдвое? Начальная температура газа T_0 .

А. $\frac{3}{2}RT_0$. Б. $\frac{5}{2}RT_0$. В. $5RT_0$. Г. $2RT_0$. Д. $3RT_0$.

6. Какое из приведенных ниже выражений справедливо для значений работы, совершаемой внешними силами при одинаковом уменьшении объема идеального газа в различных процессах?

А. $A_{\text{изот}} > A_{\text{ад}} > A_{\text{изоб}}$. Б. $A_{\text{ад}} > A_{\text{изот}} > A_{\text{изоб}}$. В. $A_{\text{изоб}} > A_{\text{изот}} > A_{\text{ад}}$. Г. $A_{\text{ад}} > A_{\text{изоб}} > A_{\text{изот}}$. Д. $A_{\text{изот}} = A_{\text{ад}} = A_{\text{изоб}}$.

7. При адиабатном процессе справедливо следующее соотношение между давлением и объемом газа: $pV^\gamma = \text{const}$, где γ — коэффициент, определяемый свойствами газа. Как изменится температура идеального газа с коэффициентом $\gamma = 2$, если адиабатно увеличить его объем в 4 раза?

А. Температура газа увеличится в 16 раз. Б. Температура газа увеличится в 4 раза. В. Температура газа уменьшится в 4 раза. Г. Температура газа увеличится в 2 раза. Д. Температура газа уменьшится в 2 раза.

8. Лед нагревают от температуры 263 К до точки плавления, а полученную воду нагревают до температуры 283 К. В течение опыта мощность нагревателя не изменяется. Какой из графиков зависимости температуры T от времени нагревания t соответствует этому процессу (рис. 95)? Удельная теплоемкость льда меньше удельной теплоемкости воды.

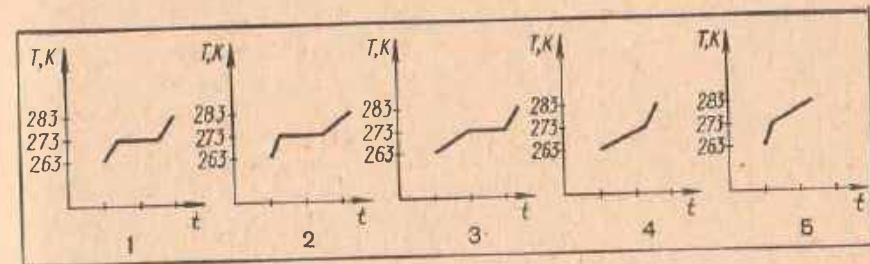


Рис. 95

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

9. Как изменится КПД идеальной тепловой машины: 1) при повышении температуры нагревателя на 1 К; 2) при понижении температуры холодильника на 1 К?

А. В первом случае повысится, во втором понизится. Б. В обоих случаях понизится. В. Повысится одинаково в обоих случаях. Г. Повысится в обоих случаях, но больше при повышении температуры нагревателя. Д. Повысится в обоих случаях, но больше при понижении температуры холодильника.

10. Какой из графиков процессов на диаграммах $p - V$, приведенных на рисунке 96, соответствует циклу карбюраторного двигателя внутреннего сгорания?

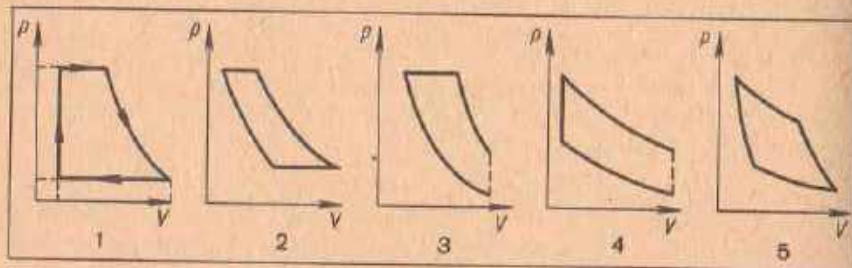
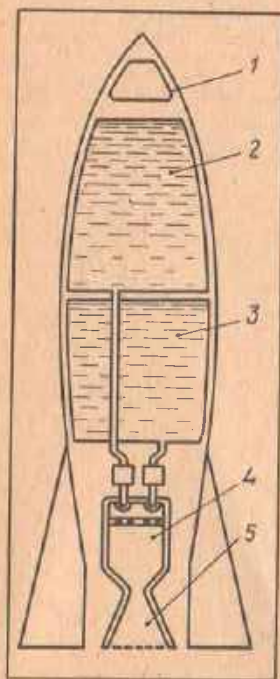


Рис. 97

↑ Рис. 96



А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

11. Какой из графиков процессов на диаграммах $p - V$, приведенных на рисунке 96, соответствует циклу дизельного двигателя внутреннего сгорания?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

12. Каким номером обозначена камера сгорания на схеме устройства жидкостной ракеты (рис. 97)?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

13. Чему равна сила тяги ракетного двигателя, если за 5 с его работы из сопла ракеты со скоростью 2 км/с выбрасываются продукты сгорания массой в 50 кг?

А. $2 \cdot 10^4$ Н. Б. 20 Н. В. $5 \cdot 10^5$ Н. Г. 500 Н. Д. 10^5 Н.

14. На рисунке 98 представлена схема устройства компрессионного холодильника. Каким номером на схеме обозначен конденсатор, в котором фреон превращается из газообразного состояния в жидкое?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

15. Какое из приведенных ниже утверждений справедливо для холодильной машины?

А. За счет совершения работы машина отбирает количество теплоты Q_2 от холодильника и передает количество теплоты Q_1 нагревателю; $Q_1 > Q_2$. Б. За счет совершения работы машина отбирает количество теплоты Q_2 от холодильника и передает количество теплоты Q_1 нагревателю; $Q_1 < Q_2$. В. За счет совершения работы машина отбирает количество теплоты Q_2 от холодильника и передает количество теплоты Q_1 нагревателю; $Q_1 = Q_2$. Г. За счет совершения работы машина отбирает количество теплоты Q_1 от нагревателя и передает количество теплоты Q_2 холодильнику; $Q_1 > Q_2$. Д. За счет совершения работы машина отбирает количество теплоты Q_1 от нагревателя и передает количество теплоты Q_2 холодильнику; $Q_1 \leq Q_2$.

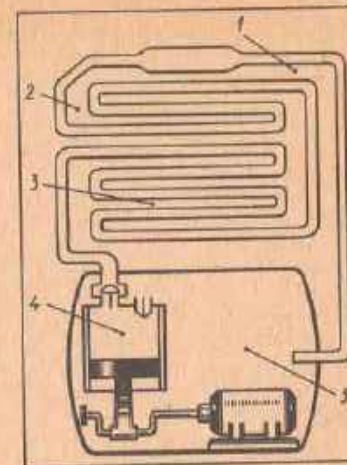


Рис. 98

§ 20. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

З а д а н и е 8. Определение удельной теплоемкости свинца

Оборудование: свинец (дробь) 0,15 — 0,2 кг, картонная трубка, термометр лабораторный, воронка, линейка ученическая.

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. 99) 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 тем-

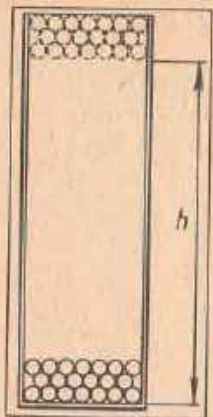


Рис. 99

пературы 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 :

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{\Delta U}{m\Delta T} = \frac{A}{m\Delta T} = \frac{Nmgh}{m\Delta T} = \frac{Ngh}{\Delta T}.$$

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.
4. Измерьте температуру дроби, учитывая указания, содержащиеся в пункте 2. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу и вычислите удельную теплоемкость свинца:

№ п/п	h , м	T_1 , К	N	T_2 , К	ΔT , К	c , Дж/(кг · К)
1						
2						

5. Через 15 — 20 мин повторите опыт.

Задание 9. Сравнение молярных теплоемкостей металлов

Оборудование: алюминиевое, медное и железное тела массами 50 — 100 г, калориметр, мензурка, термометр лабораторный, сосуд с водой, плитка электрическая, весы технические 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:

$$C = 3R \approx 25 \text{ Дж/(моль · К)}.$$

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 воду объемом 100 см³ при комнатной температуре. Измерьте начальную температуру воды и калориметра T_1 .
4. Опустите в калориметр медное тело, нагретое до температуры 100°C, 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:

$$Q = (c_k m_k + c_v m_v)(\Theta - T_1),$$

где m_k — масса калориметра, c_k — удельная теплоемкость вещества, из которого изготовлен калориметр, m_v — масса воды в калориметре, c_v — удельная теплоемкость воды, T_1 и Θ — начальная и конечная температуры калориметра и воды.

6. Используя выражение $C = \frac{QM}{m \cdot \Delta T}$, вычислите молярную теплоемкость меди.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу:

Вещество	Масса тела m , кг	Масса калориметра m_k , кг	Масса воды в калориметре m_a , кг	Начальная температура воды и калориметра T_1 , К	Температура при установлении теплового равновесия Θ , К	Изменение температуры тела ΔT , К	Количество теплоты, переданного телом калориметру Q , Дж	Молярная масса вещества M , кг/моль Молярная теплоемкость вещества C , Дж/(моль · К)
Медь								
Железо								
Алюминий								

Аналогичные измерения с алюминиевыми и железными телами выполняют другие ученики и записывают в таблицу.

7. Оцените погрешность выполненных измерений. Определите, находится ли отличие полученных результатов от предсказаний теории в пределах возможных ошибок измерений.

ГЛАВА III. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

§ 21. 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 при этом их алгебраическая сумма всегда остается постоянной.

Закон Кулона записывается в форме

$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad (21.1)$$

и означает, что между двумя точечными электрическими зарядами q_1 и q_2 действует сила $\vec{F}_3$, прямо пропорциональная произведению зарядов и обратно пропорциональная квадрату расстояния R между ними. Сила $\vec{F}_3$ 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 действия нескольких зарядов на один заряд является геометрической суммой сил, определяемых по закону Кулона для попарного взаимодействия с каждым из них** (рис. 100).

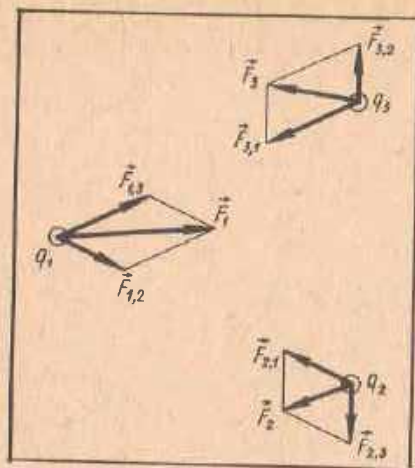


Рис. 100

Эту закономерность взаимодействия электрических зарядов называют *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 $\vec{F}$. Этот факт позволяет высказать предположение, что вокруг каждого электрического заряда существует нечто материальное, неразрывно связанное с этим зарядом. Это «нечто» назвали **электрическим полем**. Взаимодействие точечных элект-

рических 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 $\vec{F}$, действующей на электрический заряд q_1 , помещенный в данную точку поля, к заряду q_1 :

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_1} \quad (21.2)$$

Из выражений (21.1) и (21.2) следует:

$$q_1 E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2},$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R^2} \quad (21.3)$$

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.**

За направление вектора напряженности $\vec{E}$ электрического поля принято направление вектора силы $\vec{F}$, 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*.

Линии напряженности считаются выходящими из положительных зарядов и входящими в отрицательные заряды (рис. 101).

Чтобы по линиям напряженности можно было определять не только направление вектора напряженности, но и его модуль, условились через единицу поверхности, перпендикулярной вектору, проводить число линий, равное модулю вектора напряженности. Тогда по числу линий, пронизывающих единицу площади, можно узнать модуль напряженности электрического поля.

При таком условии через сферу радиусом R вокруг точечного заряда q проходит число линий напряженности

$$N = ES = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \cdot 4\pi R^2 = \frac{q}{\epsilon_0}.$$

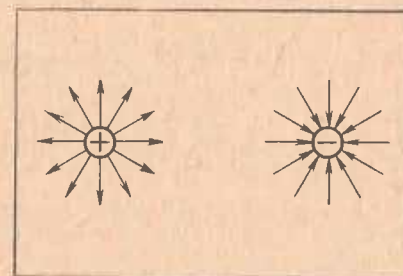


Рис. 101

Следовательно, число линий напряженности, выходящих из положительного заряда или входящих в отрицательный заряд, пропорционально модулю электрического заряда и равно:

$$N = \frac{q}{\epsilon_0},$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная. Линии напряженности вокруг неподвижного точечного заряда в пространстве расположены равномерно, т. е. через любые участки одинаковой площади на поверхности сферы, центр которой совпадает с точечным электрическим зарядом, проходит одинаковое число линий напряженности. Это следует из того, что модуль напряженности электрического поля в любой точке поверхности сферы одинаков.

Для количественной характеристики электрического поля вводится понятие потока вектора напряженности электрического поля. Поток Φ вектора напряженности электрического поля через участок поверхности, перпендикулярной вектору напряженности, называют числом линий напряженности, пронизывающих данный участок поверхности. Будем считать число линий, выходящих из поверхности, положительным, а число линий, входящих в поверхность, — отрицательным. Общее число линий напряженности Φ находится как алгебраическая сумма.

Поток вектора напряженности электрического поля через поверхность сферы, внутри которой находится точечный электрический заряд q , равен:

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (21.4)$$

Поток от всех остальных электрических зарядов, находящихся вне сферы, равен нулю, так как от них в сферу входит столько линий напряженности, сколько и выходит.

Теорема Гаусса. Согласно принципу суперпозиции, поля электрических зарядов не влияют друг на друга. Поэтому если внутри замкнутой поверхности любой формы находятся точечные электрические заряды $q_1, q_2, \dots, q_n$, то общий поток вектора напряженности электрического поля равен сумме потоков от каждого заряда:

$$\Phi = \frac{\sum q_i}{\epsilon_0} \quad (21.5)$$

Это утверждение называют теоремой Гаусса.

Если число линий напряженности через единицу поверхности, перпендикулярной вектору $\vec{E}$, равно модулю напряженности, то поток Φ вектора напряженности через поверхность площадью S равен:

$$\Phi = ES. \quad (21.6)$$

Используя теорему Гаусса, можно вычислить 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 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, ось 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. 102).

Согласно теореме Гаусса поток Φ вектора напряженности электрического поля через поверхность цилиндра связан с электрическим зарядом внутри цилиндра выражением

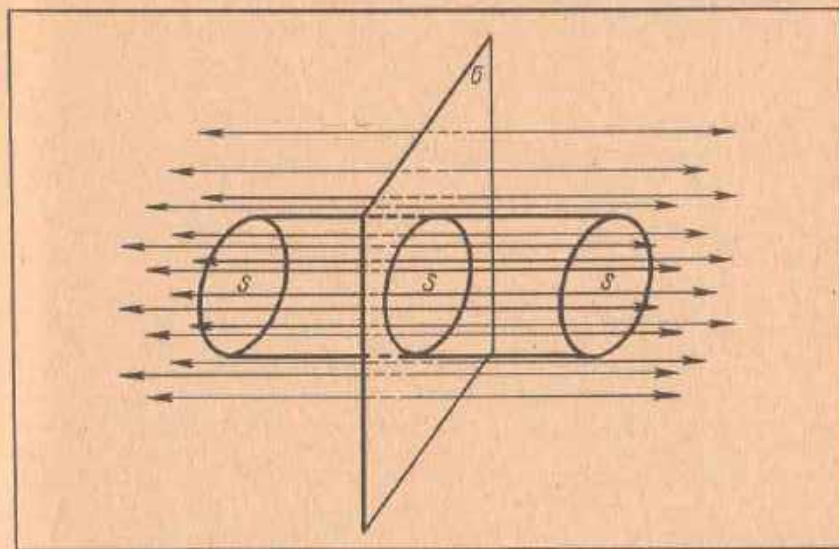


Рис. 102

$$\Phi = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma S}{\epsilon_0} \quad (21.7)$$

С другой стороны, так как линии напряженности пересекают лишь основания цилиндра, поток вектора напряженности можно выразить через напряженность электрического поля у оснований цилиндра:

$$\Phi = E \cdot 2S.$$

Из двух выражений для потока вектора напряженности получим:

$$E \cdot 2S = \frac{\sigma S}{\epsilon_0}, \quad E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (21.8)$$

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:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} + \frac{\sigma}{2\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (21.9)$$

Так как $\sigma = \frac{q}{S}$, где q — заряд одной пластины конденсатора, S — ее площадь, то

$$E = \frac{q}{S\epsilon_0} \quad (21.10)$$

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. 103).

Потенциал электрического поля точечного заряда. Так как на заряд, помещенный в электрическое поле, действует сила $\vec{F}_3$, 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, где напряженность поля стремится к нулю, потенциальная энергия взаимодействия любого другого заряда q_1 с зарядом q равна нулю. При таком условии потенциальную энергию E_{p1} 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:

$$A_{12} = -\Delta E_p = -(E_{p2} - E_{p1}).$$

Если $E_{p2} = 0$, т. е. заряд q_1 удаляется на бесконечно большое расстояние от заряда q , то

$$A_{12} = E_{p1},$$

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_3 , действующей на заряд q_1 со стороны электрического поля:

$$A_{12} \sim F_3,$$

а сила F_3 пропорциональна перемещаемому заряду q_1 , так как в любой точке поля равна:

$$\vec{F}_3 = q_1 \vec{E}.$$

Следовательно, потенциальная энергия E_{p1} заряда в электрическом поле пропорциональна заряду:

$$E_{p1} = q_1 \varphi_1.$$

Величина φ_1 , определяемая как отношение потенциальной энергии E_{p1} заряда в данной точке электрического поля к заряду:

$$\varphi_1 = \frac{E_{p1}}{q_1},$$

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

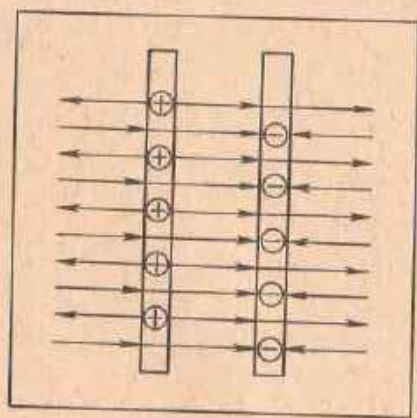


Рис. 103

через разность потенциалов поля в этих точках:

$$A_{12} = -(E_{p_2} - E_{p_1}) = -(q_1\varphi_2 - q_1\varphi_1) = q_1(\varphi_1 - \varphi_2).$$

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 $\vec{F}_s$, действующая на заряд 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_s от координат нелинейная. При обратно пропорциональной зависимости силы F_s от квадрата расстояния до заряда работа электрического поля при перемещении вдоль линии напряженности оказывается равной произведению среднего геометрического значения силы F_s на перемещение Δr :

$$A_{12} = F_{cp}\Delta r = \sqrt{F_1 F_2}\Delta r.$$

Преобразуя это выражение, получим:

$$A_{12} = \sqrt{k \frac{q_1 q}{r_1^2} \cdot k \frac{q_1 q}{r_2^2}} (r_2 - r_1) = k \frac{q_1 q}{r_1 r_2} (r_2 - r_1) = q_1 \left(k \frac{q}{r_1} - k \frac{q}{r_2} \right).$$

При удалении заряда q_1 на бесконечно далекое расстояние от заряда q ($r_2 \rightarrow \infty$, $k \frac{q}{r_2} = 0$) работа электрического поля по определению равна потенциальной энергии заряда в данной точке поля:

$$A_{12} = q_1 k \frac{q}{r_1} = E_{p_1}.$$

С другой стороны, по определению потенциала φ электрического поля потенциальная энергия равна:

$$E_{p_1} = q_1 \varphi_1,$$

откуда

$$\varphi_1 = k \frac{q}{r_1}.$$

Следовательно, потенциал φ электрического поля на расстоянии r от точечного заряда q определяется выражением

$$\varphi = k \frac{q}{r}.$$

Потенциал электрического поля φ системы неподвижных электрических зарядов в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ полей отдельных зарядов в этой точке:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n.$$

В чем заключается смысл принципа суперпозиции электрических полей?

Что такое поток вектора напряженности электрического поля?

Как связан поток вектора напряженности электрического поля с электрическими зарядами и напряженностью электрического поля?

§ 22. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Электрический ток. Если в проводнике существует электрическое поле, то свободные носители заряда, кроме беспорядочного теплового движения, совершают упорядоченное движение под действием этого поля. Упорядоченное движение электрических зарядов называют электрическим током. За направление тока принято направление движения положительных зарядов. Отношение заряда Δq , протекающего через поперечное сечение проводника за промежуток времени Δt , к этому времени называют силой тока. Сила тока равна:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Чтобы в проводнике протекал постоянный во времени электрический ток, внутри проводника должно поддерживаться одинаковое распределение электрического поля. Это возможно только при включении проводника в электрическую цепь, в которой имеется источник тока, восстанавливающий изменяющееся распределение электрических зарядов в проводнике.

Отношение работы A по перемещению электрического заряда q на участке цепи к значению заряда q называют напряжением U . Напряжение равно:

$$U = \frac{A}{q}.$$

Закон Ома для участка цепи. Экспериментально установлено, что отношение напряжения U на концах проводника к силе тока I при включении в любую электрическую цепь остается величиной постоянной. Эту величину назвали электрическим сопротивлением R :

$$R = \frac{U}{I}.$$

Выражение

$$I = \frac{U}{R}$$

называют *законом Ома для участка цепи*. Если на участке электрической цепи на заряд действуют только силы электростатического поля, работа A по перемещению заряда q равна произведению разности потенциалов на заряд q :

$$A = (\varphi_1 - \varphi_2)q.$$

В этом случае напряжение U на участке цепи равно разности потенциалов:

$$U = \frac{A}{q} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Закон Ома для участка цепи без источника ЭДС имеет вид

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}.$$

Если на участке цепи на заряд, кроме электростатических сил, действуют сторонние силы, то работа A по перемещению заряда q равна:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q\xi,$$

где $q\xi$ — работа сторонних сил, ξ — электродвижущая сила источника. В этом случае напряжение на участке цепи равно алгебраической сумме разности потенциалов и ЭДС источника:

$$U = \frac{A}{q} = (\varphi_1 - \varphi_2) + \xi.$$

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС, имеет вид

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \xi}{R}.$$

Правила Кирхгофа. При расчетах токов и напряжений в сложных электрических цепях удобно пользоваться правилами Кирхгофа.

Первое правило Кирхгофа относится к точкам электрической цепи, в которых сходятся несколько проводников. Такие точки называют *узлами цепи*. Если сила тока в каждом из проводников электрической цепи не изменяется со временем, то это значит, что не изменяется со временем распределение электрических полей и, следовательно, распределение электрических зарядов. Ни в одной точке заряды не накапливаются, ни в одной не убывают. В этом случае выполняется *первое правило Кирхгофа*: алгебраическая сумма токов, сходящихся в каждом узле, равна нулю:

$$\sum I_k = 0. \quad (22.1)$$

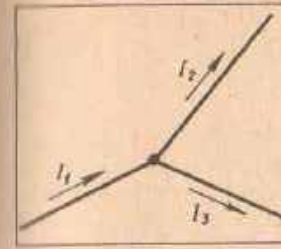


Рис. 104

←

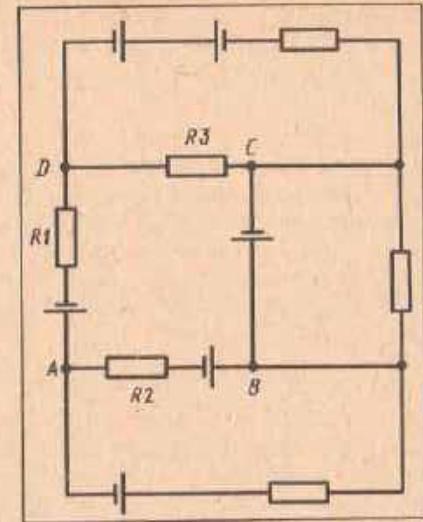


Рис. 105

→

При этом токи, идущие к узлу, считают положительными, а исходящие из узла — отрицательными.

Например, для узла из трех проводников (рис. 104) на основании первого правила Кирхгофа можно записать уравнение

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \text{ или } I_1 = I_2 + I_3.$$

Второе правило Кирхгофа применимо к любому замкнутому контуру, произвольно выделенному в сложной электрической цепи. Рассмотрим, например, электрическую цепь, представленную на рисунке 105. Покажем, что для установления связи между значениями силы тока на участках цепи контура $ABCD$ и ЭДС источников в этом контуре нет необходимости знать сведения о параметрах элементов цепи вне этого контура.

На основании закона Ома для участка цепи с учетом знака ЭДС источников можно записать систему уравнений:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\varphi_A - \varphi_D - \xi_1}{R_1}, & I_1 R_1 &= \varphi_A - \varphi_D - \xi_1, \\ I_2 &= \frac{\varphi_B - \varphi_A + \xi_2}{R_2}, & I_2 R_2 &= \varphi_B - \varphi_A + \xi_2, \\ I_3 &= \frac{\varphi_D - \varphi_B - \xi_3}{R_3}, & I_3 R_3 &= \varphi_D - \varphi_B - \xi_3. \end{aligned} \text{ или}$$

Сложив равенства, получим:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 = -\xi_1 + \xi_2 - \xi_3.$$

На этом основании можно сформулировать *второе правило Кирхгофа*: в любом замкнутом контуре цепи алгебраическая сумма произведений сил токов в отдельных участках на их сопротивления равна алгебраической сумме ЭДС источников в этом контуре:

$$\sum I_k R_k = \sum \xi_k. \quad (22.2)$$

Для нахождения распределения токов и напряжений в сложных электрических цепях с использованием правил Кирхгофа можно составить систему уравнений для всех узлов и контуров цепи и решить эту систему.

- В каком случае напряжение на участке цепи равно разности потенциалов? Чем отличаются выражения закона Ома для участков цепи без источников ЭДС и участков цепи с источниками ЭДС? Что называют узлом электрической цепи? В каком случае можно пользоваться первым правилом Кирхгофа? В каком случае можно пользоваться вторым правилом Кирхгофа?

§ 23. ДИЭЛЕКТРИКИ И ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Любое тело, помещенное в электрическое поле, электризуется. На той стороне поверхности тела, в которую входят силовые линии электрического поля, образуется избыток отрицательных зарядов, а на противоположной стороне возникает избыточный положительный заряд. Электрическое поле индуцированных зарядов в веществе направлено противоположно внешнему полю.

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 части проводника 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 называют поляризацией; он заключается в перераспределении зарядов внутри нейтральных атомов и молекул под действием поля либо в поворотах диполей в полярных диэлектриках.

Заряды на поверхности наэлектризованного полем тела уменьшают напряженность внешнего поля E_0 в пространстве, занимаемом образцом.

Величину, показывающую, во сколько раз напряженность поля E в веществе меньше напряженности поля E_0 в вакууме, называют относительной диэлектрической проницаемостью данного вещества:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

Электреты. В некоторых диэлектриках поляризация не исчезает сразу после устранения внешнего электрического поля. Ди-

электрики, длительно сохраняющие поляризацию после устранения внешнего электрического поля и создающие в окружающем пространстве собственное электрическое поле, называют 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.

В существовании электретных свойств оргстекла можно убедиться на простом опыте, схема которого изображена на рисунке 106. 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 10 — 15 с под напряжением, 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.

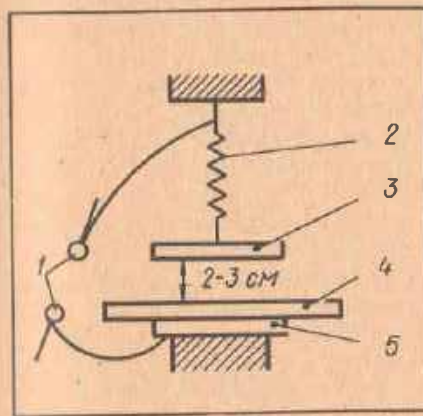


Рис. 106

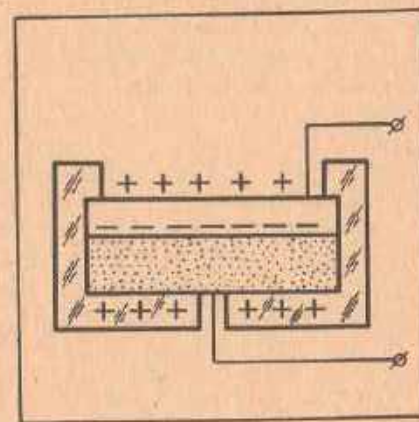


Рис. 107

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 поляризацию 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. 107). При колебаниях мембраны зазор между мембраной и поверхностью электрета меняется. Это приводит к изменению емкости конденсатора мембрана — электрет. Изменение емкости конденсатора при постоянном заряде на его обкладках приводит к тому, что на выходных 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, т. е. два точечных разноименных заряда. 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, называют сегнетоэлектриками. Основные свойства сегнетоэлектриков впервые были изучены в 30-х годах советскими физиками И. В. Курчатовым и П. П. Кобеко на кристаллах сегнетовой соли. Впоследствии было открыто и исследовано около 80 сегнетоэлектриков. Наиболее интересным для практических применений является титанат бария $BaTiO_3$, открытый в 1944 г. советским физиком Б. М. Булом.

Внесение сегнетоэлектрика в электрическое поле приводит к

тому, что в части его доменов все диполи ориентируются вдоль линий напряженности (рис. 108). При плавном увеличении напряженности электрического поля происходит поочередная ориентация 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. Напряженность этого поля, необходимая для устранения остаточной поляризации, называют коэрцитивной силой. Для монокристаллов титаната бария коэрцитивная сила достигает 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 $10^3 - 10^4$), применяют 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 исче-



И. В. Курчатов

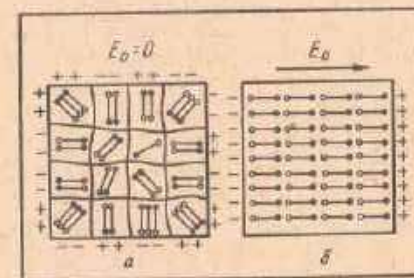


Рис. 108

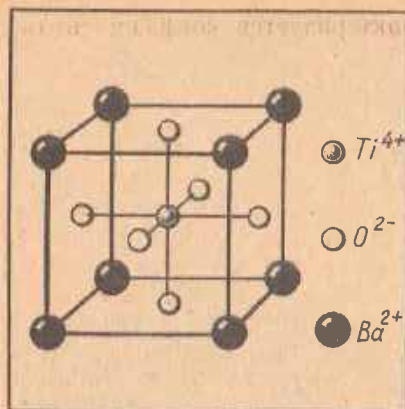


Рис. 109

зает и сегнетоэлектрик становится обычным диэлектриком. Точка Кюри для титаната бария близка к температуре 120°С. 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 идеальным кубической (рис. 109). Она обладает центром симметрии, совпадающим с положением

иона титана Ti^{4+} . Центры положительного и отрицательного зарядов ионов в каждой ячейке совпадают.

При переходе точки Кюри в сторону снижения температуры элементарные ячейки преобразуются. В одном из направлений 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 называют 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.

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. Деформация пропорциональна приложенной разности потенциалов и зависит от пьезомодуля. Прямой и обратный пьезоэффекты широко применяют в практике для преобразования механических колебаний в электрические и электрических в механические. Пьезоэлектрический элемент находится в головке современного электрофона для воспроизведения грамзаписи.

Что происходит с проводниками и диэлектриками при помещении их в электрическое поле?

Чем объясняется явление поляризации диэлектриков?

Что такое электреты и где их применяют?

Что такое сегнетоэлектрики и где их применяют?

В чем заключается пьезоэлектрический эффект?

§ 24. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Проводники, полупроводники и диэлектрики. Разделение материалов на проводники и диэлектрики является очень грубым. Строго говоря, электрические заряды (электроны, ионы), свободные от связей в результате неравномерного распределения энергии теплового движения, имеются в любом твердом, жидком или газообразном теле.

Как видно из таблицы 4, удельное электрическое сопротивление различных твердых тел меняется в чрезвычайно широких пределах.

Таблица 4

Удельное электрическое сопротивление твердых тел (при $t = 20^\circ\text{C}$)

Материал	Ом · м	Материал	Ом · м
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	Германий	$5,0 \cdot 10^{-1}$
Алюминий	$2,8 \cdot 10^{-8}$	Селен серый	$10^2 - 10^4$
Железо	$9,8 \cdot 10^{-8}$	Кремний	$10^3 - 10^4$
Свинец	$2,1 \cdot 10^{-7}$	Мрамор	$10^6 - 10^9$
Нихром	$1 \cdot 10^{-6}$	Кварц	$10^9 - 10^{10}$
Графит	$8 - 20 \cdot 10^{-6}$	Слюда	$10^{11} - 10^{13}$
Сернистый свинец	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Алмаз	$10^{12} - 10^{14}$
Теллур	$1 \cdot 10^{-2}$	Сера	$2 \cdot 10^{17}$

Твердые тела условно делят обычно на три группы: проводники со значением удельного сопротивления $\rho < 10^{-6}$ Ом·м, диэлектрики (изоляторы) — $\rho > 10^8$ Ом·м и полупроводники с промежуточными значениями удельного сопротивления 10^{-6} Ом·м $< \rho < 10^8$ Ом·м.

В группу проводников в твердом состоянии попадают все металлы. Разделение твердых тел на три группы по значениям удельного электрического сопротивления является условным и формальным. Однако такому делению есть и более серьезные основания.

Удельное электрическое сопротивление не является физической константой, а зависит от температуры и других внешних воздействий. С повышением температуры удельное электрическое сопротивление металлов увеличивается, а у неметаллических тел — полупроводников и диэлектриков — резко уменьшается.

Если подвергнуть кристалл металла освещению или направить на него поток заряженных частиц, то это не скажется на его электропроводности, а освещение или бомбардировка частицами полупроводников и диэлектриков вызывает сильное уменьшение их электрического сопротивления.

Введение примесей в чистые кристаллы металлов, как правило, увеличивает их удельное электрическое сопротивление. Примеси в кристаллах диэлектриков и полупроводников могут в миллионы раз уменьшать их удельное электрическое сопротивление.

Деление неметаллов на диэлектрики и полупроводники довольно условно. Многие вещества, ранее считавшиеся типичными диэлектриками (сера, алмаз, карбид кремния), в настоящее время начинают использоваться в технике как полупроводники. Графит в одних условиях обнаруживает черты сходства с металлами (сверхпроводимость), в других — с полупроводниками (зависимость удельного электрического сопротивления от температуры).

Чтобы понять и объяснить свойства металлов, диэлектриков и полупроводников, нужно обратиться к особенностям их кристаллической структуры.

Строение и электрические свойства металлов. В опытах советских физиков Л. И. Мандельштама и И. Д. Папалекси по наблюдению электрического тока при торможении быстро вращающейся проволочной катушки и в ряде других опытов было показано, что подвижными носителями заряда в металлах являются электроны. Наличие подвижных электронов в металлах объясняется, во-первых, относительно слабой связью валентных электронов с атомами, во-вторых, тем, что кристаллы металлов, как правило, обладают плотнейшей гранцентрированной кубической (медь, алюминий, золото, серебро, платина) или гексагональной (цинк, титан, кобальт, магний) упаковкой атомов. В результате плотной упа-

ковки атомов, относительно слабо связанными электронами внешние электронные оболочки перекрываются и валентные электроны получают возможность свободно перемещаться от одного атома к другому. Число таких коллективизированных электронов составляет от 0,53 (у лития) до 2,7 (у платины) на атом металла. Дробность этого числа означает, что, например, у лития коллективизируется в среднем один валентный электрон на два атома. В большинстве случаев можно считать, что коллективизируется в среднем один валентный электрон на атом металла.

Предположение, что коллективизация валентных электронов металла является следствием плотной упаковки, хорошо согласуется с данными эксперимента. Удельное электрическое сопротивление неметаллических кристаллов фосфора, серы и других, подвергнутых давлению 10^9 — 10^{10} Па, уменьшается до значений удельного электрического сопротивления металлов. При таком давлении атомы фосфора сближаются настолько плотно, что их электронные оболочки перекрываются, а валентные электроны теряют связь с определенным атомом (т. е. обобществляются, как в металлах). В грубом приближении обобществленные электроны металла можно считать свободными, совершающими в отсутствие электрического поля хаотическое движение между ионами кристаллической решетки подобно тому, как движутся атомы газа, заключенного в сосуде. Свободные электроны металла правильнее назвать электронами проводимости, так как они движутся не в вакууме, а в кристалле и поэтому не являются полностью свободными.

Высокая концентрация электронов проводимости и большая свобода их перемещения обуславливают хорошую электропроводность металлов. Это свойство металлов является результатом взаимодействия атомов, образующих кристалл, и не присуще отдельным атомам. Поэтому пары металлов являются такими же хорошими изоляторами, как и обычные газы.

Если в кристалле металла создать электрическое поле, то на каждый электрон будет действовать сила $F = -eE$. Под действием этой силы возникает направленное движение электронов проводимости, которое накладывается в виде дрейфа на их хаотическое тепловое движение. Так возникает электрический ток. При свободном движении под действием постоянной силы скорость электронов должна была бы непрерывно увеличиваться, и в связи с этим должен возрастать со временем и создаваемый ими ток. На самом деле при постоянном напряжении в металлическом проводнике течет постоянный ток. Этот факт можно объяснить потерями энергии электронами при столкновениях со встречающимися на их пути ионами кристалла.

Однако, если видеть причину электрического сопротивления металлов в столкновениях электронов с ионами в узлах решетки, то невозможно объяснить уменьшение их электрического сопротивления до нуля при приближении температуры к абсолют-

ному нулю, увеличение сопротивления при нагревании и другие свойства. Приведем несколько примеров.

При длине свободного пробега электрона порядка 10^{-10} м, равной межатомному расстоянию в кристалле, удельное электрическое сопротивление металлов, как показывают расчеты, должно быть в 10—1000 раз больше того, каким они на самом деле обладают. Это означает, что электроны в металле на самом деле проходят без столкновений десятки и тысячи межатомных расстояний.

Иногда увеличение электрического сопротивления металлов при нагревании объясняют тем, что с повышением температуры усиливаются колебания ионов в узлах кристаллической решетки и столкновения электронов с ионами становятся более частыми. При этом длина свободного пробега электронов и средняя скорость их направленного движения уменьшаются, а электрическое сопротивление возрастает. Но такое объяснение ошибочно. Ведь стрелы с завязанными глазами, одинаково трудно попасть и в покоящуюся, и в колеблющуюся мишень.

Для выяснения причины, приводящей к увеличению электрического сопротивления металлов при нагревании, обратимся к опытным фактам.

Введение примесей в металл практически не меняет концентрацию электронов проводимости и, казалось бы, не должно вызывать изменения его электропроводности. Однако в действительности примеси увеличивают сопротивление металлов электрическому току. Например, удельное сопротивление тщательно очищенной меди при температуре 20°C составляет $0,0168 \cdot 10^{-6}$ Ом · м, а удельное сопротивление меди с примесью 1% марганца — $0,048 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. Это почти втрое выше сопротивления чистой меди. Сильное влияние примесей на удельное сопротивление металлов может быть объяснено тем, что их электрическое сопротивление обусловлено нарушениями структуры кристаллической решетки.

Влияние структурных дефектов на сопротивление электрическому току хорошо подтверждается в опытах, не связанных с введением чужеродных атомов. Например, удельное сопротивление проволоки из технической меди после протяжки возрастает с $0,0172 \cdot 10^{-6}$ до $0,0177 \cdot 10^{-6}$ Ом · м. Исследования показали, что в совершенных монокристаллах при низких температурах длина свободного пробега электронов достигает 1 см, т. е. в 10^8 — 10^9 раз превышает межатомные расстояния.

Таким образом, электрическое сопротивление обусловлено не столкновениями электронов с атомами или ионами в узлах решетки, а взаимодействием электронов с различного рода нарушениями в структуре кристалла. Поэтому повышение температуры, сопровождающееся увеличением числа дефектов в структуре кристалла из-за смещений атомов из положения равновесия,

приводит к уменьшению длины свободного пробега электронов и увеличению сопротивления.

Строение и свойства диэлектриков и полупроводников. На примере алмаза, кремния и графита нетрудно убедиться, что электрические свойства твердых тел зависят от строения кристаллической решетки и от типа атомов в ее узлах. Кристаллы алмаза и графита построены из одинаковых атомов — атомов углерода, но их кристаллические решетки существенно отличаются друг от друга. Как видно из таблицы 4, удельное электрическое сопротивление диэлектрика алмаза в 10^{18} — 10^{20} раз превышает удельное электрическое сопротивление полупроводника графита. С другой стороны, кристаллические решетки типичных полупроводников кремния и германия по геометрическому строению ничем не отличаются от кристаллической решетки алмаза, и удельное электрическое сопротивление кремния при комнатной температуре в 10^{11} — 10^{12} раз меньше, чем у алмаза. Очевидно, в данном случае различие в типе атомов, находящихся в узлах решеток, явилось причиной того, что удельные электрические сопротивления этих двух кристаллов при одинаковых условиях так различны. Как же объяснить эти факты?

Каждый четырехвалентный атом углерода в алмазе, так же как и каждый четырехвалентный атом кремния в кристалле кремния, окружен четырьмя ближайшими одинаковыми атомами и связан с ними ковалентными связями посредством восьми электронов (четыре собственных и по одному от каждого из четырех соседних атомов). Движение электронов в каждой межатомной связи и вокруг каждого атома согласовано так, что приход одного электрона как раз следует за уходом другого.

Но могут ли такие электроны быть носителями тока? Поместим наш кристалл в электрическое поле. Тогда на каждый электрон будет действовать сила $F = -eE$, но переместиться в направлении действия силы электрон сможет только тогда, когда освободится место, занятое другим электроном в связи. Но так как все связи укомплектованы, перемещение электронов возможно лишь путем обмена местами. В этом случае ток в кристалле не возникает.

Рассмотренная картина отвечает идеальному кристаллу при температуре абсолютного нуля, когда все валентные электроны заняты в связях, все узлы укомплектованы атомами, примесные атомы и другие дефекты отсутствуют. Она объясняет, почему при низких температурах полупроводники, как и диэлектрики, являются хорошими изоляторами: при этих условиях в них нет носителей заряда, способных под действием электрического поля участвовать в направленном движении и создавать электрический ток.

Таким образом, полупроводники и диэлектрики принципиально отличаются от металлов не большими значениями удельного электрического сопротивления при 'нормальных' условиях, а тем,

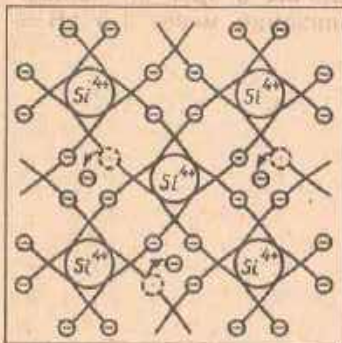


Рис. 110

что при температуре абсолютного нуля их сопротивление бесконечно велико.

Почему же при температуре около 300 К кремний проводит электрический ток, а алмаз является изолятором?

Допустим, что каким-либо способом один из электронов удален из связи, как это изображено на рисунке 110. Этот электрон не может участвовать в связи с другими атомами, так как все эти связи укомплектованы (насыщены). Такой электрон свободно перемещается по кристал-

лу, как электроны в металлах, и может участвовать в создании тока, если в кристалле создано электрическое поле. Конечно, сила связи электронов с атомами и энергия, необходимая для отрыва от атома (энергия ионизации), зависят от сорта атомов, образующих кристалл. Измерения и теоретическая оценка энергии отрыва электронов от атомов в кристаллах алмаза и кремния показали, что для алмаза энергия ионизации составляет около $7 \text{ эВ} = 11,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, а для кремния — $1,1 \text{ эВ} = 1,76 \times 10^{-19} \text{ Дж}$.

Средняя энергия теплового движения атомов твердого тела при комнатной температуре составляет около $0,04 \text{ эВ} = 0,064 \times 10^{-19} \text{ Дж}$, что значительно меньше энергии ионизации атомов в кристаллах кремния и алмаза. В то же время опыт показывает, что при любой температуре, отличной от абсолютного нуля, как в кремнии, так и в алмазе всегда имеются электроны проводимости. Электроны проводимости образуются вследствие неравномерного распределения энергии теплового движения между частицами твердого тела. Среди атомов всегда найдутся такие, энергия которых значительно превышает среднюю энергию теплового движения и достаточна для отрыва электрона.

Чем меньше энергия ионизации атомов, тем больше в кристалле освобожденных от связей электронов, т. е. электронов проводимости, и тем меньше его удельное электрическое сопротивление. При повышении температуры энергия теплового движения атомов в кристаллах возрастает и все большее число электронов освобождается от связей, т. е. становится электронами проводимости. Но в кристаллах с большей энергией ионизации атомов, т. е. у диэлектриков, концентрация электронов проводимости будет меньше, чем в полупроводниках при тех же температурах.

Как видно, между полупроводниками и диэлектриками с ковалентным типом связи атомов в кристалле нет принципиального

различия. Имеется количественное различие в энергии ионизации атомов. Кристаллы с энергией ионизации менее $1,5 \text{ эВ} = 2,4 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ относят к полупроводникам, а кристаллы с энергией ионизации атомов выше указанного значения — к диэлектрикам.

Дырочная проводимость. В полупроводниках, диэлектриках и некоторых металлах помимо обычного движения электронов проводимости имеется и другой механизм переноса зарядов. При температуре, отличной от абсолютного нуля, одновременно с освобождением части валентных электронов появляются свободные места. Когда на освободившееся место переходит электрон соседнего атома, то недостаток электрона обнаруживается в одной из связей этого атома. В отсутствие электрического поля вакантные места, как и замещающие их валентные электроны, хаотически перемещаются по кристаллу. Если в кристалле существует электрическое поле, то переходы валентных электронов на свободные места происходят в направлении, противоположном вектору напряженности. Свободные же места движутся подобно положительно заряженным частицам в направлении вектора напряженности. Перемещение многих валентных электронов оказывается электрически равносильным движению в противоположном направлении одного положительного заряда, по модулю равного заряду электрона.

Поскольку свободных мест меньше, чем валентных электронов, и перемещение одного свободного места отражает перемещение многих вакантных электронов, то сложное «эстафетное» перемещение большого числа связанных валентных электронов удобнее описывать как обычное «сквозное» движение в противоположном направлении меньшего числа фиктивных положительно заряженных частиц-дырок.

Концентрация дырок в обычном полупроводнике равна концентрации электронов проводимости, так как число электронов проводимости в точности равно числу оставленных ими мест. При встрече электрона проводимости и дырки электрон заполняет незавершенную связь, при этом дырка исчезает, а электрон становится связанным. Такой процесс называют рекомбинацией. Время, в течение которого электрон является свободным, очень мало. В зависимости от строения кристалла оно меняется от 10^{-3} до 10^{-8} с . Но тепловое движение освобождает новые электроны и создает новые дырки в других связях.

Таким образом, можно считать, что ток в кристалле осуществляется электронами проводимости и равным числом условно введенных положительных дырок. Такую электропроводность называют собственной.

Дырочную проводимость принято называть проводимостью *p*-типа (от лат. слова *positivus* — положительный), а электронную проводимость — проводимостью *n*-типа (от лат. *negativus* — отрицательный).

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры.

С повышением температуры полупроводников увеличивается число дефектов в кристалле, препятствующих (как и в металлах) направленному перемещению носителей заряда. Но электрическое сопротивление образца при этом не возрастает, так как этот эффект перекрывается более сильным — увеличением концентрации дырок и электронов проводимости, приводящим к уменьшению сопротивления полупроводника.

Не только нагревание, но и другие энергетические воздействия (освещение, бомбардировка электронами, ионами) создают в полупроводниках электронно-дырочные пары и уменьшают их сопротивление. Зависимость концентрации носителей заряда от внешних воздействий является характерной особенностью полупроводников, отличающей их от металлов. При достаточно высокой температуре удельное электрическое сопротивление у части полупроводников так мало, что приближается к удельному электрическому сопротивлению металлов.

Донорные и акцепторные примеси. Удельное электрическое сопротивление полупроводников зависит не только от различных энергетических воздействий, но и от количества и вида атомов примесей. Причем в противоположность металлам увеличение концентрации примесей в полупроводниках приводит не к увеличению, а к резкому уменьшению их сопротивления.

Изучение влияния примесей на электропроводность практически важно потому, что действие большинства полупроводниковых приборов основано на использовании влияния примесей на электрические свойства полупроводников. Остановимся на двух наиболее характерных частных случаях.

В кристалл кремния вводится небольшое количество примеси атомов с большей валентностью, например, пятивалентных атомов мышьяка. Пятивалентный атом мышьяка обеспечивает четыре ковалентные связи с окружающими атомами кремния, а его пятый электрон оказывается не занятым в связях, ему нет места в насыщенных валентных связях (рис. 111).

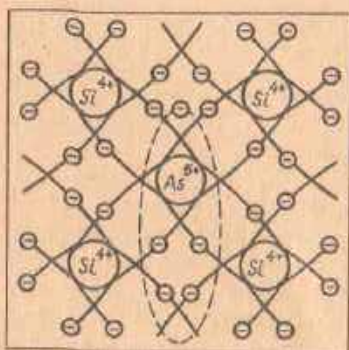


Рис. 111

Энергия отрыва (энергия ионизации) пятого валентного электрона мышьяка в кремнии составляет $0,05 \text{ эВ} = 0,08 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$, что равно примерно средней энергии теплового движения атомов при комнатной температуре и в 20 раз меньше энергии отрыва электрона от атома кремния. Поэтому уже при комнатной температуре почти все атомы мышьяка лишаются одного из своих электронов и становятся положительными ионами.

Положительные ионы мышьяка не могут захватить электроны соседних атомов, так как все четыре связи у них укомплектованы электронами. Поэтому эстафетного перемещения электронной вакансии — дырки — не происходит, в этом случае дырочной проводимости нет. Примеси, поставляющие электроны проводимости без возникновения равного количества подвижных дырок, называют донорами. В полупроводнике, содержащем донорные примеси, электроны, сорванные с доноров, являются основными, но не единственными носителями тока, так как небольшая часть собственных атомов полупроводника ионизирована и часть тока осуществляется дырками. Такие полупроводники называют электронными полупроводниками *n*-типа.

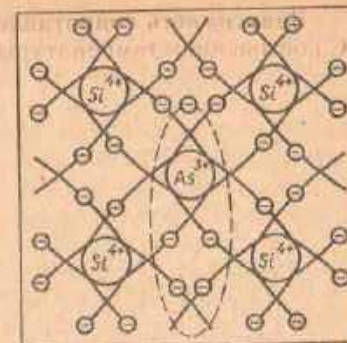


Рис. 112

В кристалле кремния часть атомов может быть замещена атомами трехвалентного элемента, например индия. Атом индия может осуществить связь только с тремя соседними атомами, а с четвертым атомом связь оказывается незавершенной (рис. 112). При этих условиях электрон одного из соседних атомов кремния может заполнить эту связь. Тогда атом индия станет неподвижным отрицательным ионом, а на месте электрона, ушедшего от одного из атомов кремния, образуется дырка. Примеси, захватывающие электроны и создающие тем самым подвижные дырки, не увеличивая при этом числа электронов проводимости, называют акцепторами.

При низких температурах основные носители тока в полупроводнике с акцепторной примесью — дырки, а неосновные носители — электроны, сорванные с собственных атомов. Полупроводники, в которых концентрация дырок превышает концентрацию электронов проводимости, называют полупроводниками *p*-типа.

Разумеется, введение примесей в полупроводники, как и в металлах, нарушает правильное строение кристаллической решетки и затрудняет движение электронов. Но сопротивление полупроводников не увеличивается потому, что увеличение концентрации носителей приводит к более значительному уменьшению сопротивления. Например, примесь в количестве одного атома бора на 10^5 атомов кремния уменьшает удельное электрическое сопротивление кремния примерно в 1000 раз, а примесь одного атома индия на 10^5 — 10^9 атомов германия уменьшает удельное электрическое сопротивление германия в миллионы раз.

Возможность управлять удельным сопротивлением путем вве-

дения примесей широко используется при изготовлении полупроводниковых приборов.

Дырочная проводимость не является исключительной особенностью полупроводников. У некоторых металлов и их сплавов имеется и смешанная электронно-дырочная проводимость. Это происходит за счет «эстафетного» движения некоторой части неколлективизированных валентных электронов. Например, в цинке, бериллии, кадмии, сплавах меди с оловом дырочная составляющая электрического тока даже преобладает над электронной.

Терморезисторы, фоторезисторы. Сильная зависимость электропроводности полупроводников от температуры нашла применение в устройстве терморезисторов, впервые изготовленных в 1933 г. советским физиком Б. Т. Коломийцем. Для изготовления терморезисторов обычно используют двухкомпонентные смеси оксидов металлов. Широко используют в практике смеси оксидов кобальта и марганца, смесь оксида титана (IV) и оксида магния.

Технология изготовления терморезисторов в основном сводится к прессованию заготовок и спеканию их при высокой температуре для увеличения механической прочности. Возможность смешивать исходные материалы в любых пропорциях позволяет получать терморезисторы с широким диапазоном удельного сопротивления. Терморезисторы чаще всего применяют для автоматического измерения, контроля и регулирования температуры. Обычно для этой цели терморезистор включают последовательно с источником тока и обмоткой электромагнитного реле. При повышении температуры сопротивление терморезистора уменьшается, а сила тока в цепи возрастает. Параметры реле и терморезистора подбирают такими, что при достижении заданной температуры сила тока становится достаточной для срабатывания реле, включающего световой или звуковой сигнал.

Уменьшение сопротивления полупроводников под действием света используют при устройстве фоторезисторов. Обычно фоторезистор представляет собой пленку полупроводника (сернистый свинец, сернистый кадмий), нанесенную на стеклянную пластину. По краям пленки методом напыления наносят металлические электроды.

Если фоторезистор включить последовательно с обмоткой электромагнитного реле и источником тока, то при освещении фоторезистора его сопротивление уменьшается, сила тока в цепи возрастает и реле включает сигнальное устройство. Можно собрать электрическую схему так, что реле включит сигнальное устройство, когда луч света будет перекрыт непрозрачным предметом. Фоторезисторы применяют для подсчета изделий на конвейерном производстве, в автоматах, предохраняющих работающих на прессе от несчастных случаев и др.

Термоэлектродвижущая сила в металлах и полупроводниках. Проведем такой опыт. Будем располагать пластины из испытуемых металлов и полупроводников на массивном медном основа-

нии и нагревать их сверху электрическим паяльником. Холодный электрод (медный брусок) и горячий (жало паяльника) соединим с гальванометром. Опыт показывает, что при таких условиях в цепи возникает электрический ток. Появление тока в замкнутой цепи свидетельствует о возникновении на каком-то ее участке электродвижущей силы. Если убрать образец или прикоснуться к образцу ненагретым паяльником, то ток не наблюдается, — следовательно, ЭДС не возникает. Значит, ЭДС возникнет в полупроводниковом образце при условии, что температура его граней неодинакова. Эту электродвижущую силу называют термоэлектродвижущей силой, а само явление — термоэлектрическим эффектом или эффектом Зеебека, по имени открывшего его немецкого ученого. Опыт показывает, что направление тока различно для разных образцов, а его значение для металлов много меньше, чем для полупроводников.

Выясним механизм возникновения термоэлектродвижущей силы. По мере нагревания верхней части образца в ней увеличивается концентрация свободных носителей зарядов, электронов или дырок. Это приводит к их перемещению путем диффузии от горячей части образца к холодной. В результате такого перемещения заряженных частиц холодная часть образца приобретает заряд, знак которого соответствует знаку носителей заряда. Горячая часть образца приобретает противоположный по знаку заряд.

В веществах, где носителями заряда одновременно являются дырки и электроны, значение термоэлектродвижущей силы меньше, чем в материалах с одним типом носителей. Одновременная диффузия дырок и электронов в сторону менее нагретой части образца приводит к взаимной компенсации зарядов. Знак термоэлектродвижущей силы соответствует тем носителям, концентрация и скорость движения которых больше. Материалом, в котором термоэлектродвижущая сила не возникает, является свинец, поэтому его часто используют в качестве электродов при ее измерениях.

- ? Какова природа электрического сопротивления металлов?
В чем сходство и различие полупроводников, металлов и диэлектриков?
При каких условиях возникает проводимость n -типа?
Каков механизм дырочной проводимости?
Какие реальные частицы являются носителями заряда в материалах с проводимостью p -типа?
Нарисуйте принципиальные схемы устройств для измерения температуры или температурной сигнализации с использованием терморезисторных датчиков.
Как определяют знак носителей заряда методом термозонда?
Объясните механизм возникновения термоэлектродвижущей силы в материалах p -типа, не пользуясь понятием «дырка».

Рассмотрим явления, происходящие на границе раздела двух полупроводниковых кристаллов с различным типом основных носителей зарядов. 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. В дырочном полупроводнике электроны захватываются атомами с неполным комплектом электронов. Этот процесс, в результате которого «исчезают» свободный электрон и дырка, называют рекомбинацией (рис. 113, а).

Рекомбинация свободных электронов и дырок у границы раздела кристаллов с различным типом проводимости приводит к образованию в слое n -полупроводника объемного заряда неподвижных положительных ионов атомов донорных примесей, а в пограничном слое p -полупроводника — отрицательного объемного заряда неподвижных отрицательных ионов акцепторных примесей (рис. 113, б). Появление объемного заряда приводит к возникновению приконтактного электрического поля такого направления, что оно препятствует вызвавшему его переходам электронов из n - в p -полупроводник.

По обе стороны границы раздела возникает слой, сопротивление которого значительно превышает сопротивление остальной части кристалла. Этот слой с повышенным сопротивлением и называют $p-n$ -переходом.

Особенностями $p-n$ -перехода, обеспечившими его широкое применение в различных полупроводниковых приборах, являются сильная зависимость его сопротивления от значения приложенного напряжения и от направления тока через $p-n$ -переход.

Выпрямительные свойства $p-n$ -перехода. Если к кристаллу с $p-n$ -переходом приложить внешнее напряжение так, что плюс подан на n -область, а минус — на p -область, то направления внешнего и внутреннего электрических полей совпадают. Это приводит к увеличению ширины запирающего слоя. Сопротивление $p-n$ -перехода при этом возрастает и через него течет лишь небольшой ток неосновных носителей, называемый обратным током.

Если к кристаллу приложено внешнее напряжение такой полярности, что направления внешнего и внутреннего электрических полей противоположны, то переходы основных носителей через $p-n$ -переход облегчаются. Двигаясь навстречу друг другу, основные носители входят в запирающий слой, уменьшая его толщину. При увеличении внешнего напряжения толщина запирающего слоя стремится к нулю и через кристалл течет прямой ток, значение которого определяется сопротивлением кристалла при отсутствии запирающего слоя.

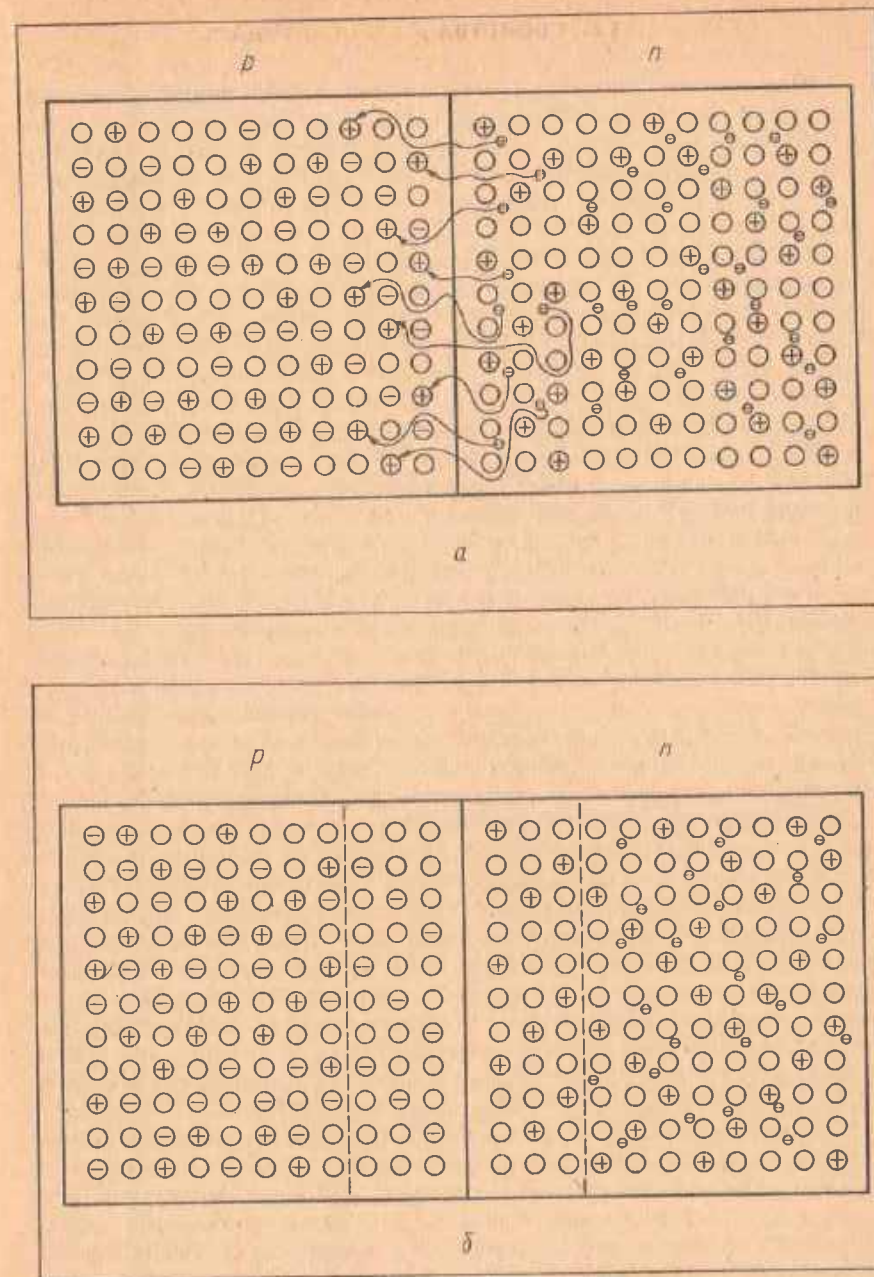


Рис. 113

Способность $p-n$ -перехода пропускать ток практически только в одном направлении используется в устройстве полупроводниковых диодов, преобразующих переменный ток в постоянный, точнее, в пульсирующий.

Важная характеристика диода — коэффициент выпрямления — отношение прямого тока к обратному при напряжении 1 В. В хороших диодах коэффициент выпрямления велик (порядка 10^4).

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 оксида 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 — концентрация 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 бесконечно, 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 соответство-

вать окончательный скачок потенциала $U_{\text{отт}} \rightarrow U$ (рис. 114). Таковы в общих чертах механизмы термоэлектрического и фотогальванического эффектов на $p-n$ -переходе, заключающихся в возникновении ЭДС при нагревании или освещении $p-n$ -перехода.

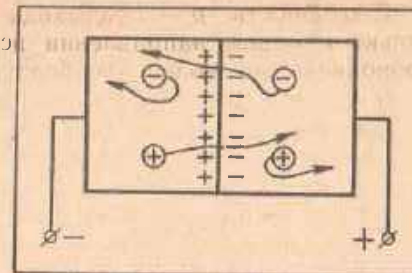


Рис. 114

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. Термо- или фотоэлектродвижущая сила может достигать 1 В. Максимальное ее значение не может быть больше скачка потенциала.

Устройства с $p-n$ -переходом, предназначенные для преобразования теплоты или энергии света непосредственно в электрическую энергию, называют термо- или фотоэлементами.

Для получения большей ЭДС термо- или фотоэлементы соединяют в батарею последовательно, как обычные источники тока. Такие батареи называют 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.

Световое излучение, возникающее при рекомбинации электронов и дырок в $p-n$ -переходе, используется в светодиодах. КПД светодиодов достигает 40%. Светодиоды применяют в качестве элементов световых индикаторов в системах отображения информации. 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.

- ? Как образуется $p-n$ -переход?
 Почему $p-n$ -переход обладает свойствами односторонней проводимости?
 Каков механизм термоэлектрического и фотогальванического эффектов на $p-n$ -переходе?
 Каков принцип действия полупроводникового холодильника?

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 почти полностью заменили вакуумные лампы.

Для изготовления транзистора может быть использован монокристалл германия с электронной проводимостью, в котором с двух сторон создаются области с дырочной проводимостью,

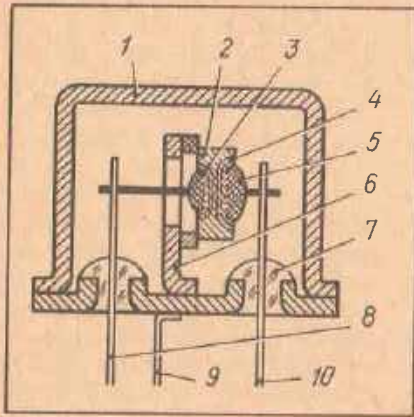


Рис. 115. Устройство спаяного транзистора:

1 — баллон транзистора, 2 — кристалл германия (база), 3 — эмиттер, 4 — коллектор, 5 — индиевый электрод, 6 — кристаллодержатель, 7 — стеклянные изоляторы, 8 — вывод эмиттера, 9 — вывод базы, 10 — вывод коллектора

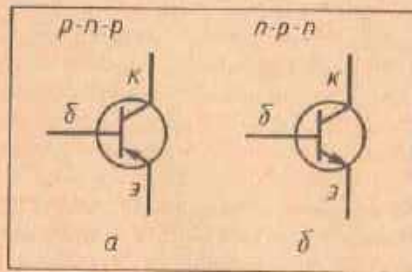


Рис. 116

а на границах соприкосновения их с основным кристаллом возникают два $p-n$ -перехода. Среднюю область кристалла называют базой транзистора, а две крайние области кристалла, обладающие проводимостью противоположного базе типа, называют коллектором и эмиттером (рис. 115). Условное обозначение транзисторов на схемах представлено на рисунке 116.

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 вывода 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 ба-

зой, с общим эмиттером и с общим коллектором (рис. 117).

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 $U_{бэ}$, по абсолютной величине меньшего, чем коллекторное напряжение $U_{кэ}$.

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 концентрация электронов в базе довольно низка, а толщина базы мала, большинство дырок успевает путем диффузии пересечь базу и достигнуть коллекторного $p-n$ -перехода, не встретившись ни с одним из электронов базы. 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 запирающем 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,

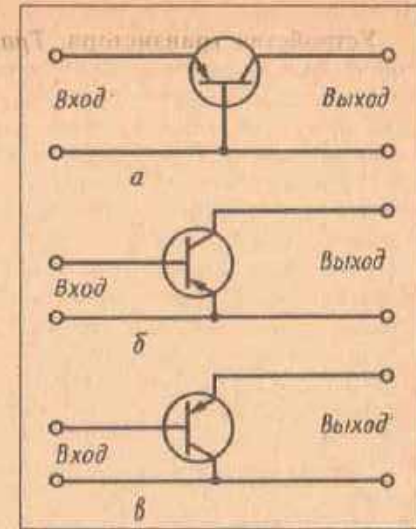


Рис. 117

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 вхождением электронов через базовый ввод. Таким образом, ток, протекающий через эмиттерный вывод транзистора в активном состоянии I_e , оказывается равным сумме токов, протекающих через его коллекторный I_k и базовый I_b выводы: $I_e = I_k + I_b$.

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. 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 токов в транзисторе в активном состоянии представлена на рисунке 118.

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 связи между током коллектора I_k и током базы I_b , можно приближенно записать так:

$$I_k = \beta I_b.$$

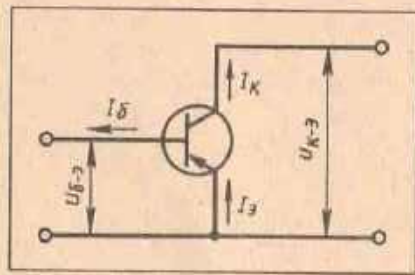


Рис. 118

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 $\Delta I_{вых}$ к изменению входного тока $\Delta I_{вх}$. Это отношение называют *коэффициентом усиления транзистора по току* K_T :

$$K_T = \frac{\Delta I_{вых}}{\Delta I_{вх}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} = \beta.$$

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 напряжению при включении в цепь коллектора сопротивления R_n , значение которого должно быть рассчитано для каждого конкретного случая (рис. 119).

Включение нагрузочного сопротивления R_n 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_n :

$$U_{к-э} = E - I_k R_n.$$

Изменение тока коллектора на некоторую величину ΔI_k приводит к изменению напряжения между выходными клеммами транзистора на величину

$$\Delta U_{вых} = \Delta I_k R_n.$$

Отношение этого изменения напряжения на выходных клеммах транзистора $\Delta U_{вых}$ к вызвавшему его изменению напряжения на входе $\Delta U_{вх}$ называют *коэффициентом усиления каскада по напряжению*; он равен:

$$K_n = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta I_k R_n}{\Delta I_b R_{вх}} = \beta \frac{R_n}{R_{вх}}.$$

?

Каков механизм усиления тока в транзисторе?

Чем определяется коэффициент усиления тока с помощью транзистора?

Как включают транзистор в электрическую схему для усиления электрических сигналов?

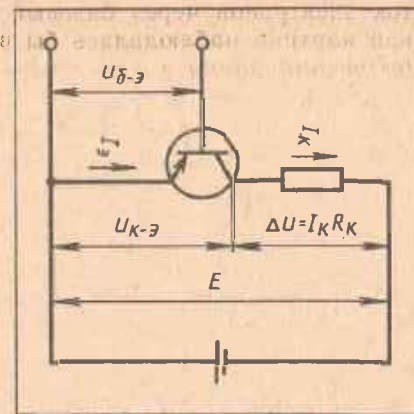


Рис. 119

Чем определяется коэффициент усиления транзисторного каскада по напряжению?

§ 27. 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 сделалось 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*.

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 необязательно 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 неподвижных точечных электрических зарядов q_1 и q_2 , находящихся в вакууме на расстоянии R друг от друга, описывается законом Кулона:

$$F_3 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2} \quad (27.1)$$

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, электроннолучевую трубку осциллографа. Параллельно электронному пучку расположим проводник. Провод в целом электрически нейтрален, поэтому поднесение проводника к электроннолучевой 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 электроннолучевой трубки, светящаяся точка на экране осциллографа смещается из своего первоначального положения (рис. 120). Смещение светового пятна на экране трубки свидетельствует о том, что траектория движения элект-

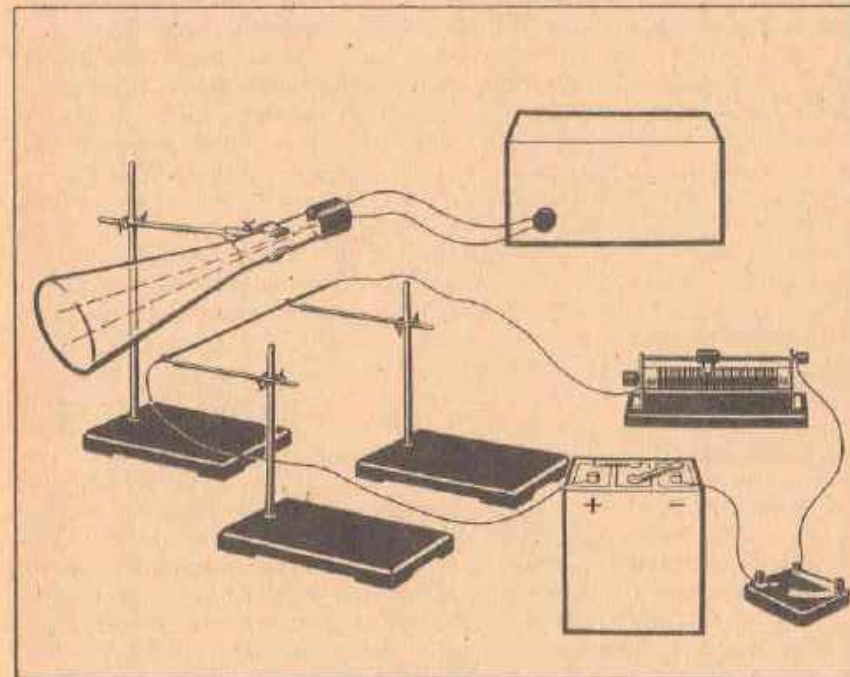


Рис. 120

ронов в ней изменилась. Следовательно, при возникновении тока в проводнике на электроны, движущиеся в электроннолучевой 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 модуля электрических зарядов. Удаляя проводник с током от трубки, мы обнаруживаем, что смещение электронного луча уменьшается с увеличением расстояния между проводником и электронным лучом. Результаты тщательного выполненных опытов подобного рода позволяют сделать вывод, что сила магнитного взаимодействия движущихся электрических зарядов F_m обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними R :

$$F_m \sim \frac{1}{R^2} \quad (27.2)$$

Исследовать зависимость силы магнитного взаимодействия от модуля скорости движения зарядов можно путем изменения напряжения, 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:

$$F_m \sim v_1 v_2. \quad (27.3)$$

Для установления зависимости силы магнитного взаимодействия от электрического заряда движущихся частиц могут быть использованы пучки однозарядных и многозарядных ионов, которые получают примерно таким же способом, как и электронные пучки. Опыты с ионными пучками показывают, что сила магнитного взаимодействия прямо пропорциональна электрическим зарядам движущихся частиц:

$$F_m \sim q_1 q_2. \quad (27.4)$$

Объединив выражения (27.2), (27.3), (27.4), получим:

$$F_m = k' \frac{q_1 q_2 v_1 v_2}{R^2}, \quad (27.5)$$

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 .

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 (27.5). 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 ближнего действия 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 ближнего действия 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. 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

$$B = \frac{F_m}{qv} \quad (27.6)$$

где F_m — 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 q , но и от его направления.

Из всех возможных направлений движения электрического заряда в данной точке магнитного поля два противоположных друг другу являются особенными: при движении по этим направлениям с любой скоростью сила действия магнитного поля на электрический заряд равна нулю, при движении в перпендикулярном направлении она принимает максимальное значение. Из этих двух направлений принято условно за направление вектора

индукции $\vec{B}$ то направление, с которым векторы $\vec{v}$ и $\vec{F}_m$ при движении положительного заряда образуют правую тройку.

При движении положительного заряда вектор силы $\vec{F}_m$ направлен в сторону движения винта с правой нарезкой, вращаемого в направлении от вектора $\vec{v}$ к вектору $\vec{B}$ через меньший угол (рис. 121). Для отрицательного заряда направление силы $\vec{F}_m$ противоположно определяемому этим правилом.

Таким образом, модуль вектора магнитной индукции $\vec{B}$ 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 $\vec{B}$ 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 $\vec{B}$. Эту единицу называют тесла (Тл).

Из определения вектора индукции (27.6) следует, что при движении электрического заряда в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции, сила $\vec{F}_m$, действующая на заряд q_1 со стороны магнитного поля, созданного зарядом q_2 , определится согласно выражению

$$F_m = q_1 v_1 B_2, \quad (27.7)$$

где B_2 — индукция магнитного поля.

Магнитное поле движущегося электрического заряда. Из экспериментального факта: два одноименных электрических заряда при движении в параллельных направлениях притягиваются друг к другу силами магнитного взаимодействия — можно сделать вывод о направлении вектора магнитной индукции в любой точке вокруг движущегося заряда. Как видно из рисунка 122, в произвольной точке, лежащей на плоскости, проходящей через движущийся

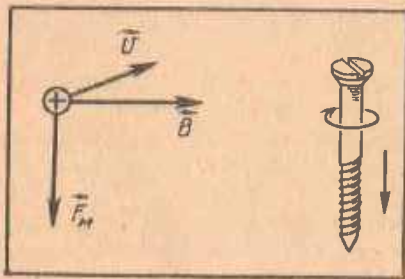


Рис. 121

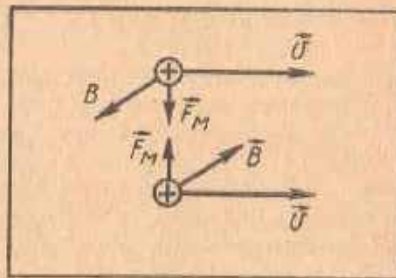


Рис. 122

заряд q перпендикулярно вектору скорости $\vec{v}$, вектор магнитной индукции $\vec{B}$ его магнитного поля лежит в этой плоскости и перпендикулярен радиусу-вектору, соединяющему движущийся заряд с данной точкой.

Из выражений (27.5) и (27.7) можно получить:

$$B_2 = k' \frac{q_2 v_2}{R^2}. \quad (27.8)$$

Выражение (27.8) 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 :

$$B = k' \frac{qv}{R^2}, \quad (27.9)$$

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 q 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: 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 v относительно точки A как сумму двух движений со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, можно 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. 123). Движение заряда со скоростью $\vec{v}_2$ приводит к возникновению магнитного поля в точке A с индукцией, определяемой выражением (27.9):

$$B = k' \frac{qv_2}{R^2}. \quad (27.10)$$

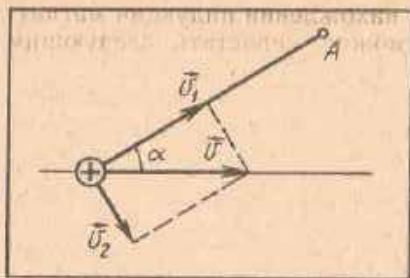


Рис. 123

Так как $v_2 = v \sin \alpha$, то выражение (27.10) 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

$$B = k' \frac{qv}{R^2} \sin \alpha. \quad (21.11)$$

Закон Био — Савара — Лапласа. Если известно выражение, определяющее вектор индукции магнитного поля, создаваемого одним движущимся электрическим зарядом (27.11), 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, созданного в той же точке зарядом q_2 и т. д. для всех остальных электрических зарядов до последнего n -го. Вектор магнитной 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. 124):

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Разумеется, расчеты никогда не выполняются буквально

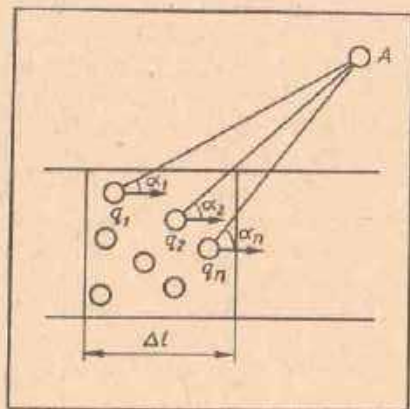


Рис. 124

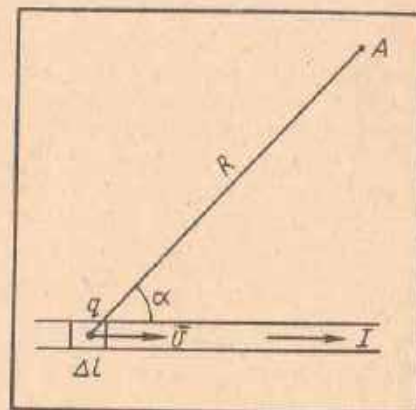


Рис. 125

таким способом. Решение задачи нахождения индукции магнитного поля проводника с током можно упростить следующим образом.

Рассмотрим прямолинейный элемент проводника длиной Δl , в котором протекает электрический ток I (рис. 125). 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, протекающего за то же время через поперечное сечение проводника, равно: $q = I \cdot \Delta t$, то количество свободных зарядов в элементе проводника длиной Δl равно:

$$q = I \cdot \Delta t = I \frac{\Delta l}{v}. \quad (27.12)$$

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 (27.11) и (27.12) в точке A на расстоянии R от элемента проводника и направлении под углом α к нему равна:

$$B = k' \frac{qv}{R^2} \sin \alpha = k' \frac{I \Delta l}{v R^2} v \sin \alpha = k' \frac{I \Delta l}{R^2} \sin \alpha. \quad (27.13)$$

Это выражение было найдено французским ученым Пьером Лапласом на основании анализа результатов, полученных французскими физиками Жаном Батистом Био и Феликсом Саваром при экспериментальном исследовании магнитных полей с током и носит название закона Био — Савара — Лапласа.

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 окружности (см. пример 26):

$$B = 2\pi k' \frac{I}{R}. \quad (27.14)$$

Индукция магнитного поля на расстоянии R от бесконечного прямого проводника с током I определяется выражением

$$B = k' \frac{2I}{R}. \quad (27.15)$$

- ? От чего зависит сила магнитного взаимодействия движущихся зарядов?
 Как определяют модуль и направление вектора индукции магнитного поля?
 От чего зависит модуль вектора индукции равномерно движущегося электрического заряда?
 От чего зависит индукция магнитного поля, создаваемого элементом проводника с током?

§ 28. 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 модуля 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

$$F_m = qvB\sin\alpha, \quad (27.16)$$

где α — угол между векторами индукции $\vec{B}$ магнитного поля и скорости $\vec{v}$ электрического заряда (рис. 126).

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 движущиеся электрические заряды в этом элементе проводника. Будем считать, что все электроны в проводнике движутся с одинаковыми скоростями упорядоченного движения $\vec{v}$ и вектор магнитной индукции $\vec{B}$ имеет одинаковое значение по модулю и постоянное направление по всей длине элемента проводника. Тогда полную силу F действия магнитного поля на элемент проводника с током можно найти умножением силы F_m , действующей на один электрон, на число электронов, которые принимают участие в создании электрического тока в элементе проводника Δl :

$$F = F_m N = evB\sin\alpha nS\Delta l, \quad (27.17)$$

где n — концентрация свободных электронов в проводнике, S — площадь поперечного сечения проводника, Δl — длина элемента проводника. Используя

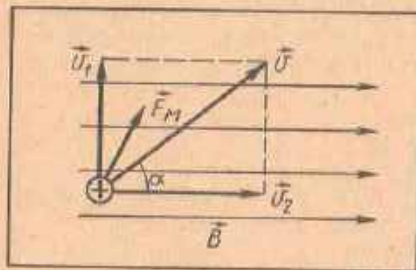


Рис. 126

зная известное выражение силы тока в проводнике $I = enSv$, можно выразить силу магнитного взаимодействия элемента проводника с током через силу тока в проводнике I , его длину Δl и индукцию магнитного поля B в том месте, где расположен элемент проводника с током:

$$F = I\Delta l B\sin\alpha, \quad (27.18)$$

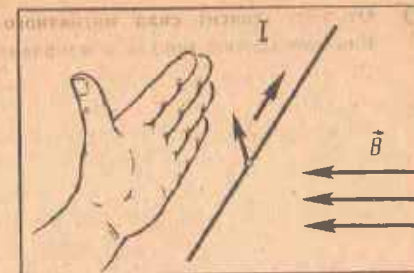


Рис. 127

где α — угол между элементом проводника и вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Это выражение называют **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 вектор индукции магнитного поля входил в ладонь, то отогнутый в плоскости ладони большой палец укажет направление вектора силы Ампера $\vec{F}$ (рис. 127).

Используя выражения (27.15) и (27.18), можно определить силу действия магнитного поля бесконечного прямого проводника с током I_2 на элемент проводника с током I_1 длиной Δl на расстоянии R :

$$F = I_1\Delta l B_2\sin\alpha = I_1\Delta l k' \frac{2I_2}{R} \sin\alpha. \quad (27.19)$$

В случае взаимодействия параллельных проводников угол равен 90° и выражение (27.19) принимает вид

$$F = 2k' \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}. \quad (27.20)$$

Определение коэффициентов k' и μ_0 . Магнитное взаимодействие проводников с током используют 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 (27.20) значения $R = 1$ м, $\Delta l = 1$ м, $I_1 = I_2 = 1$ А и $F = 2 \cdot 10^{-7}$ Н, получим значение коэффициента k' в СИ:

$$2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} = 2k' \frac{1 \text{ А}^2 \cdot 1 \text{ м}}{1 \text{ м}}; k' = 10^{-7} \text{ Н/А}^2. \quad (27.21)$$

Однако вместо коэффициента k' в СИ обычно используют коэффициент μ_0 , называемый *магнитной постоянной*:

$$\mu_0 = 4\pi k' = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2. \quad (27.22)$$

Расчетные формулы. Заменяя постоянную k' магнитной постоянной μ_0 , можно получить в новом виде формулы для расчета силы магнитного взаимодействия электрических зарядов, движущихся параллельно:

$$F_m = \mu_0 \frac{q_1 q_2 v_1 v_2}{4\pi R^2}, \quad (27.23)$$

индукции магнитного поля движущегося электрического заряда:

$$B = \mu_0 \frac{qv}{4\pi R^2} \sin \alpha, \quad (27.24)$$

закона Био — Савара — Лапласа:

$$B = \mu_0 \frac{Idl}{4\pi R^2 \sin \alpha}, \quad (27.25)$$

индукции магнитного поля в центре кругового тока:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}, \quad (27.26)$$

индукции бесконечного прямого проводника с током:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}, \quad (27.27)$$

силы магнитного взаимодействия прямолинейных параллельных проводников с током:

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2 \Delta l}{2\pi R}. \quad (27.28)$$

К этим формулам добавим без вывода формулу для расчета индукции магнитного поля внутри катушки, длина которой значительно превосходит радиус витка ее обмотки:

$$B = \mu_0 n I, \quad (27.29)$$

где n — число витков на единицу длины катушки. У конца длинной катушки индукция магнитного поля в 2 раза меньше, чем внутри ее:

$$B = \mu_0 \frac{nI}{2}. \quad (27.30)$$

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 $\vec{F}_e$ и $\vec{F}_m$:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q(\vec{v}B\sin\alpha).$$

Эту силу $\vec{F}$ взаимодействия электрических зарядов, учитывающую существование электрического и магнитного полей, называют *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 $\vec{F}_m$ силы Лоренца $\vec{F}_L$, но и ее электрическая составляющая $\vec{F}_e$. Причиной изменения напряженности электрического поля 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: в природе не существуют электрические и магнитные поля как самостоятельные материальные объекты. Существует лишь единое электромагнитное поле, действие которого на электрический заряд определяется выражением

$$\vec{F}_L = \vec{F}_e + \vec{F}_m.$$

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.

МГД — генератор. Действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды широко используется для преобразования различных видов энергии в электрическую энергию. Устройство и принцип действия электромеханических электрических генераторов изучено в основном курсе физики. Рассмотрим еще один вид электрических генераторов — МГД-генератор — магнитогидродинамический генератор.

Схема устройства МГД-генератора показана на рисунке 128. В камере сгорания при сжигании нефти, керосина или природного газа создается высокая температура (2000—3000 К), при которой газообразные продукты сгорания ионизируются, образуя электрон-

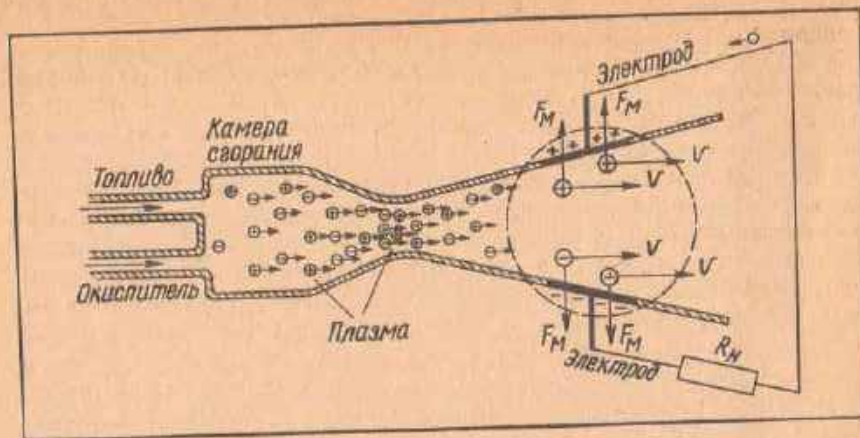


Рис. 128

но-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 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 Лоренца $F_{\text{л}}$ разделяются, как показано на рисунке 128. Электроны, достигнув нижнего электрода, движутся во внешней цепи по сопротивлению нагрузки $R_{\text{н}}$ к другому электроду, где нейтрализуют положительные ионы. Мощность, выделяемая во внешней цепи, может быть использована для различных практических нужд.

В режиме холостого хода, когда внешняя цепь разомкнута ($R_{\text{н}} = \infty$), 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 $T_1 = 2500 \text{ К}$, а на выходе $T_2 = 300 \text{ К}$, 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 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 одно преимущество МГД-генераторов: 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.

Первая опытно-промышленная электростанция У-25 с МГД-генератором мощностью 25 МВт была запущена в нашей стране в 1971 г. Ее основные параметры: топливо — природный газ; окислитель — воздух, обогащенный до 40—43% кислородом; температура продуктов сгорания 2600—2650°С; ионизирующая присадка — до 1% калия в виде дешевых и легкодоступных солей K_2CO_3 и K_2SO_4 ; расход продуктов сгорания — 50 кг/с; скорость плазмы на входе в МГД — 800—900 м/с. Плазму, выходящую из сопла, используют для получения пара с температурой 540°С и давлением 10^7 Па , используемого для дополнительного получения электроэнергии в обычном паротурбинном блоке.

Путь использования МГД-генератора в качестве надстроек к серийным паротурбинным блокам наиболее реален. При этом электрическая мощность МГД-блока составит около 45% от их суммарной мощности.

Применения МГД-генераторов не ограничиваются только большой энергетикой. Некоторые МГД-генераторы средней мощности полезны в различных физических исследованиях и технологических процессах, например для питания мощных импульсных лазеров, рентгеновских трубок и др.

Импульсный МГД-генератор «Урал» обеспечивает получение мощности $50 \cdot 10^6 \text{ Вт}$ в течение двух секунд. Он транспортабелен (на тягаче). Длина канала 1,2 м. Время вывода на режим (время запуска) 1 с. Топливо твердое — порох. Расход пороха 300 кг за 3 с.

Основные перспективы использования МГД-генераторов на электростанциях связываются с применением угольного топлива. К достоинствам угольного варианта относится более высокая электропроводность продуктов сгорания угля по сравнению с газом и мазутом при той же температуре.

Может ли сила Лоренца совершить отличную от нуля работу по перемещению электрического заряда?

Каков принцип действия МГД-генератора?

Вещество в магнитном поле. Мы рассмотрели магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов в вакууме. Будет ли оно другим в веществе? Опыт показывает, что сила магнитного взаимодействия электрических токов зависит от среды, в которой электрический ток создает магнитное поле. Если на стол поставить катушку с большим числом витков провода и рядом с ней подвесить на тонких проводах вторую небольшую катушку, то при подключении выводов катушек к источнику постоянного тока будет наблюдаться магнитное взаимодействие катушек. В зависимости от направления тока малая катушка будет притягиваться или отталкиваться от большой катушки.

При внесении в большую катушку железного стержня (сердечника) отклонение малой катушки увеличивается. Это доказывает, что магнитное поле при внесении в катушку железного стержня усиливается.

Выполняя подобные опыты с другими материалами, можно убедиться, что большинство веществ по магнитным свойствам не похоже на железо. Внесение в большую катушку стержней из дерева, стекла, алюминия, меди не вызывает заметного изменения отклонения малой катушки. Однако измерения с более чувствительными приборами показывают, что любое вещество в магнитном поле создает свое собственное поле, хотя это поле может быть очень слабым.

Вещества, которые во внешнем магнитном поле создают свое магнитное поле, очень слабо усиливающее внешнее магнитное поле, называют парамагнетиками. Например, парамагнетик-платина усиливает магнитное поле в 1,00036 раза, а жидкий кислород — в 1,0034 раза.

Вещества, которые во внешнем магнитном поле создают собственное магнитное поле, ослабляющее внешнее магнитное поле, называют диамагнетиками. В самом сильном диамагнетике — висмуте — магнитное поле ослабляется до 0,999824 раза от своего значения в вакууме.

Природа диамагнетизма. Для выяснения природы диамагнетизма рассмотрим движение свободного электрона в магнитном поле. Свободный электрон при вхождении под некоторым углом ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$) к вектору индукции однородного магнитного поля в вакууме под действием силы Лоренца движется по спиральной линии. Направление вращения электрона по виткам спирали по правилу Ленца таково, что магнитное поле, создаваемое движущимся электроном, ослабляет магнитное поле, заставляющее электрон двигаться по спирали. Следовательно, среда, содержащая свободные электроны, обладает диамагнитными свойствами.

Близким к свободному движению является движение электронов проводимости в металлах, поэтому все металлы обладают в определенной мере свойствами диамагнетика. Однако часть

металлов, кроме того, обладает еще парамагнитными и ферромагнитными свойствами, и эти свойства у них являются преобладающими.

Даже в веществах, не содержащих свободных электронов, электроны в оболочках атомов и молекул обладают некоторой степенью свободы. Влияние внешнего магнитного поля на движение электронов в оболочках атомов приводит к тому, что все вещества хотя бы в небольшой степени обладают диамагнитными свойствами.

Природа парамагнетизма. Электроны, вращающиеся вокруг ядра атома, подобны круговым токам, создающим собственное магнитное поле. В атомах многих веществ результирующий орбитальный ток, вызванный движением всех электронов, отличен от нуля, и такие атомы создают в окружающем пространстве собственное магнитное поле в отсутствие внешнего поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля результирующие электронные токи вокруг атомов и создаваемые ими магнитные поля ориентированы беспорядочно, как это условно изображено на рисунке 129, а. Поэтому вещество в целом не создает вокруг себя магнитного поля, хотя каждый атом в отдельности создает магнитное поле. Помещение такого вещества в магнитное поле вызывает ориентацию собственных магнитных полей атомов в направлении внешнего поля. В твердом теле этому препятствуют сильное взаимодействие между атомами и их тепловое движение. В результате устанавливается динамическое равновесие с определенной степенью ориентации собственных магнитных полей в направлении внешнего поля.

В достаточно сильном внешнем поле и при низких температурах

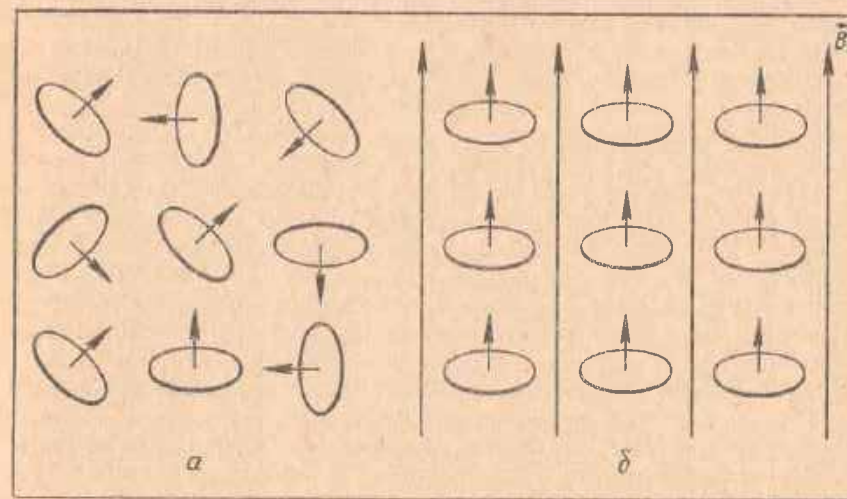


Рис. 129

может быть достигнута практически полная упорядоченность в ориентации всех атомных магнитных полей, как условно изображено на рисунке 129, б. Дальнейшее увеличение внешнего поля не вызовет увеличения собственного магнитного поля в парамагнетике. В этом заключается одно из отличий парамагнетиков от диамагнетиков, которым не свойственно насыщение. При устранении внешнего магнитного поля созданная им упорядоченность в направлении атомных полей расстраивается тепловым движением и суммарное магнитное поле парамагнетика становится равным нулю.

Однако рассмотренный механизм парамагнитного эффекта не может объяснить все свойства парамагнетиков. Значит, существует еще по крайней мере один механизм парамагнитного эффекта. Оказалось, что он связан с магнитными свойствами электронов.

Парамагнетизм электронного газа. В 1922 г. немецкие физики О. Штерн и В. Герлах в опытах по отклонению атомных пучков в неоднородном магнитном поле обнаружили, что электроны не только обладают отрицательным зарядом и обусловленным им электрическим полем, но и создают в окружающем пространстве магнитное поле. Существование магнитного поля у электрона было объяснено его вращением вокруг собственной оси. Однако не следует буквально уподоблять электрон вращающемуся заряженному шарик. Такое представление об элементарных частицах является чрезвычайно грубым и не отвечает действительности.

Свободные электроны в плазме или электроны проводимости в металле не создают в окружающем пространстве магнитного поля, так как поля отдельных электронов ориентированы в полном беспорядке. Во внешнем магнитном поле электроны поворачиваются подобно круговым токам, их собственные магнитные поля усиливают внешнее магнитное поле. В плазме парамагнитный эффект в результате ориентации собственных полей электронов в два раза превышает диамагнитный эффект от их движения в магнитном поле, поэтому электронный газ в целом проявляет парамагнитные свойства.

В атомах электроны на оболочках обычно располагаются так, что их собственные магнитные поля имеют попарно противоположную ориентацию. Поэтому не скомпенсированными собственными магнитными полями обладают только атомы с нечетным числом электронов на оболочках. Парамагнитными свойствами обладают вещества из атомов с нечетным числом электронов на оболочке, а вещества из атомов с четным числом электронов диамагнитны.

Природа ферромагнетизма. Наиболее трудной оказалась задача выяснения природы ферромагнетизма. Ферромагнитными свойствами обладают только кристаллические тела. Железо в газообразном и жидком состоянии обычно является парамагнетиком. Следовательно, ферромагнитные свойства вещества связаны с взаимодействием атомов в кристаллах. Оказалось, что ферро-

магнитные свойства вещества в основном обусловлены существованием собственных магнитных полей у электронов оболочки.

В большинстве кристаллов магнитные поля электронов взаимно компенсируются благодаря попарной антипараллельной ориентации электронов.

Лишь в некоторых кристаллах, например в кристаллах железа, возникают условия для параллельной ориентации собственных магнитных полей электронов. В результате этого внутри кристаллов ферромагнетиков возникают намагниченные области протяженностью $10^{-2} - 10^{-4}$ см. Эти самопроизвольно намагниченные области называются доменами.

Домены. В отдельных доменах магнитные поля имеют различные направления и в большом кристалле взаимно компенсируют друг друга (рис. 130, а). При внесении ферромагнитного образца во внешнее магнитное поле происходит упорядочение ориентации магнитных полей отдельных доменов.

С увеличением магнитной индукции внешнего поля B возрастает степень упорядоченности ориентации отдельных доменов и собственное магнитное поле в ферромагнетике усиливается (рис. 130, б). При некотором значении индукции $\vec{B}_0$ внешнего магнитного поля упорядочение доменов достигает максимального значения. Это явление называют магнитным насыщением.

Постоянные магниты. При вынесении ферромагнитного образца из внешнего магнитного поля значительная часть доменов сохраняет упорядоченную ориентацию — образец становится постоянным магнитом. Для изготовления постоянных магнитов применяют сталь, сплавы железа с алюминием, никелем и кобальтом, оксиды железа и некоторых других металлов.

Точка Кюри. Упорядоченность ориентации доменов в ферромагнетике может быть нарушена за счет энергии тепловых колебаний атомов в кристалле. Чем выше температура кристалла, тем быстрее разрушается порядок в ориентации доменов и разматывается образец. Температуру, выше которой вещество перестает быть ферромагнетиком, называют точкой Кюри. Точка Кюри у железа 770°C , у кобальта 1130°C , у никеля 356°C . Исчезновение ферромагнитных свойств железа при высокой температуре можно наблюдать в опыте с лезвием бритвы, притянувшимся к магниту и нагреваемым пламенем.

Применение ферромагнитных материалов. Ферромагнитные материалы, способные усиливать магнитные поля в десятки тысяч раз, широко применяют в современной технике. Стальной сердечник является одной из основных деталей электрогенератора и электродвигателя, электромагнита и трансформатора. Тонкий слой

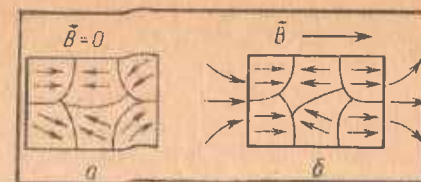


Рис. 130

ферромагнитного порошка на гибкой пленке используют для магнитной записи и воспроизведения звука в магнитофонах, записи информации в ЭВМ.

? Каков механизм диамагнетизма?
Каков механизм парамагнетизма?

Исчезает ли намагниченность диа- и парамагнетиков после прекращения действия магнитного поля?

Какие факты указывают на решающую роль взаимодействия атомов в проявлении ферромагнитных свойств вещества?

Чем объясняется сохранение магнитного поля у ферромагнетиков после устранения внешнего поля?

Почему ферромагнитные свойства вещества исчезают при температуре выше точки Кюри?

Где применяют ферромагнетики?

§ 30. ПРАКТИКУМ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

Примеры решения задач

Пример 17. Напряженность электрического поля у поверхности Земли равна примерно 130 В/м. Оцените электрический заряд земного шара.

Почва, земная кора и вода являются проводниками. Поэтому над земной поверхностью электрическое поле земного шара такое же, как электрическое поле точечного заряда, расположенного в центре Земли. Считая Землю идеальным шаром, найдем электрический заряд q по известному значению напряженности поля на расстоянии R от точечного заряда.

Решение.

$$\begin{aligned} E &= 130 \text{ В/м} \\ R &= 6,4 \cdot 10^6 \text{ м} \\ k &= 9 \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{Кл}^2 \\ q &= ? \end{aligned}$$

$$E = k \frac{q}{R^2}, \quad q = \frac{E \cdot R^2}{k};$$

$$q = \frac{130 \text{ В/м} \cdot (6,4)^2 \cdot 10^{12} \text{ м}^2}{9 \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{Кл}^2} \approx 5,7 \cdot 10^5 \text{ Кл}.$$

Пример 18. Водяная капля имеет электрический заряд, равный одному элементарному заряду. Определите массу, радиус капли и число молекул воды в ней, если известно, что действие силы тяжести на каплю уравновешивается действием электрического поля Земли. Напряженность электрического поля 130 В/м.

Решение

$$\begin{aligned} E &= 130 \text{ В/м} \\ q &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ F_g &= F_r \end{aligned}$$

$$m = ? \quad r = ? \quad N = ?$$

$$mg = eE, \quad m = \frac{eE}{g},$$

$$m \approx \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 130 \text{ В/м}}{9,8 \text{ м/с}^2} \approx 2 \cdot 10^{-18} \text{ кг};$$

$$m = V\rho = 4/3 \pi r^3 \rho,$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}},$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{-18} \text{ кг}}{4\pi \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3}} \approx 7 \cdot 10^{-8} \text{ м};$$

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

$$N = \frac{2 \cdot 10^{-18} \text{ Кл} \cdot 6 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} \approx 7 \cdot 10^7.$$

Пример 19. Две металлические пластины, между которыми находится воздух, расположены параллельно на расстоянии d . Определите разность потенциалов между пластинами, если на одной из них имеется электрический заряд $+q$, а на другой $-2q$. Площадь пластины S .

Решение. Если электрическое поле между пластинами однородно, то разность потенциалов $\Delta\varphi$ связана с напряженностью поля E выражением

$$\Delta\varphi = Ed.$$

Напряженность поля E между пластинами равна векторной сумме напряженностей $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ электрических полей, создаваемых каждой из пластин. Так как векторы $\vec{E}_1$ и $\vec{E}_2$ между пластинами параллельны, для модуля вектора напряженности получаем выражение

$$E = E_1 + E_2, \quad E = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} = \frac{q}{2S\varepsilon_0} + \frac{2q}{2S\varepsilon_0} = \frac{3}{2} \frac{q}{S\varepsilon_0},$$

$$\Delta\varphi = \frac{3qd}{2S\varepsilon_0}.$$

Пример 20. В пространство между параллельными металлическими пластинами с зарядами $+q_1$ и $-q_2$ вносят незаряженную металлическую пластину. Какие заряды будут индуцированы на поверхности пластины?

Решение. Движение свободных электронов в пластине будет происходить до тех пор, пока напряженность электрического поля внутри пластины не станет равной нулю. Это значит, что вектор напряженности однородного поля, создаваемого индуцированными зарядами, равен по модулю и противоположен по направлению вектору напряженности электрического поля заряженных пластин. По закону сохранения электрического заряда индуцированные электрические заряды равны по модулю:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{q_1}{2S\varepsilon_0} + \frac{q_2}{2S\varepsilon_0} = \frac{q_1 + q_2}{2S\varepsilon_0},$$

$$E = \frac{q}{S\varepsilon_0}, \quad q = ES\varepsilon_0 = \frac{q_1 + q_2}{2}.$$

Пример 21. Металлический шар радиусом r укреплен на изолирующей подставке и имеет электрический заряд q . Определите потенциал этого шара, если он окружен заземленной сферической оболочкой радиусом R .

Решение. Потенциал шара φ равен сумме потенциалов φ_1 и φ_2 электрических полей зарядов на шаре и на оболочке. Так как оболочка заземлена, напряженность электрического поля вне оболочки равна нулю. Это значит, что на оболочке индуцируется электрический заряд $-q$, равный по модулю и противоположный по знаку заряду на шаре. Найдем потенциалы электрических полей, создаваемых зарядами на сфере и на оболочке:

$$\varphi_1 = k \frac{q}{r}, \quad \varphi_2 = -k \frac{q}{R}.$$

Напряженность поля электрических зарядов, находящихся на оболочке, в любой точке внутри оболочки равна нулю. Поэтому потенциал электрического поля этих зарядов в любой точке внутри оболочки равен потенциалу на оболочке. Отсюда потенциал φ шара равен:

$$\varphi = k \frac{q}{r} - k \frac{q}{R} = kq \left(\frac{R-r}{Rr} \right).$$

Пример 22. Два шара одинакового радиуса R_0 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:

$$E_p = q_1 \varphi_2 = k \frac{q_1 q_2}{r},$$

затем становится равной:

$$E_{p_2} = q'_1 \varphi'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2} k \frac{\frac{q_1 + q_2}{2}}{r} = k \frac{(q_1 + q_2)^2}{4r}.$$

Для сравнения величин E_{p_1} и E_{p_2} найдем их разность ΔE_p :

$$\Delta E_p = E_{p_2} - E_{p_1} = \frac{k}{r} \cdot \left[\left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right)^2 - q_1 q_2 \right] = k \frac{(q_1 - q_2)^2}{r} > 0.$$

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:

$$E'_{p_1} = \frac{1}{2} q_1 \varphi_1 + \frac{1}{2} q_2 \varphi_2 = k \frac{q_1^2}{R} + k \frac{q_2^2}{R}.$$

После перераспределения зарядов эта энергия становится равной:

$$E'_{p_2} = \frac{1}{2} q'_1 \varphi'_1 + \frac{1}{2} q'_2 \varphi'_2 = 2k \frac{\left(\frac{q_1 + q_2}{2} \right)^2}{R} = k \frac{(q_1 + q_2)^2}{2R}.$$

Изменение потенциальной энергии $\Delta E'$ равно:

$$\begin{aligned} \Delta E' &= E'_{p_2} - E'_{p_1} = \frac{k}{2R} [(q_1 + q_2)^2 - 2(q_1^2 + q_2^2)] = \\ &= -\frac{k}{2R} (q_1 - q_2)^2 < 0, \end{aligned}$$

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.

Пример 23. Три металлические пластины площадью S расположены параллельно на расстояниях d друг от друга (рис. 131). На первой пластине имеется положительный электрический заряд q_1 , между второй и третьей пластинами включена батарея с ЭДС $\mathcal{E}$. Найдите заряды q_2 и q_3 на пластинах 2 и 3.

Решение. Заряды q_2 и q_3 равны между собой по закону сохранения электрического заряда:

$$q_2 = q_3 = q.$$

Напряжение U между пластинами равно ЭДС батареи:

$$U = \mathcal{E}.$$

Так как векторы напряженности электрических полей, создаваемых зарядами q_1 , q_2 и q_3 , имеют между пластинами 2 и 3 одинаковое направление, то

$$\begin{aligned} U &= (\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \mathcal{E}_3) d = \\ &= \left(\frac{q_1}{2S\epsilon_0} + \frac{q}{2S\epsilon_0} + \frac{q}{2S\epsilon_0} \right) d. \end{aligned}$$

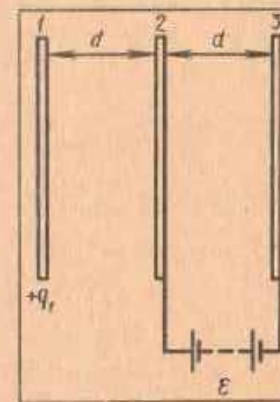


Рис. 131

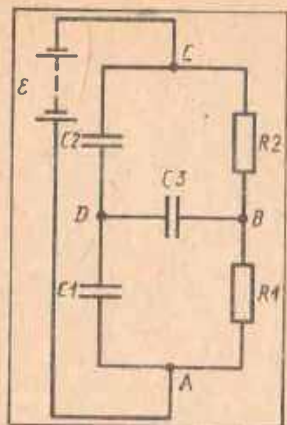


Рис. 132

Отсюда получаем:

$$\frac{q_1 d}{2S\epsilon_0} + \frac{qd}{S\epsilon_0} = \mathcal{E},$$

$$q = \frac{\epsilon_0 S \mathcal{E}}{d} - \frac{q_1}{2}.$$

Пример 24. Определите заряд конденсатора C_3 , включенного в электрическую цепь, представленную на рисунке 132, если внутреннее сопротивление батареи можно считать бесконечно малым.

Решение. Для нахождения заряда на обкладках конденсатора C_3 необходимо найти напряжение на конденсаторе U_{BD} . Так как внутреннее сопротивление батареи пренебрежимо мало, то по закону Ома для полной цепи можно записать уравнение для цепи $\mathcal{E}ABC\mathcal{E}$:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + R_2}.$$

Отсюда

$$U_{AB} = R_1 I = \frac{R_1 \mathcal{E}}{R_1 + R_2}, \quad U_{BC} = R_2 I = \frac{R_2 \mathcal{E}}{R_1 + R_2}.$$

В замкнутом контуре $\mathcal{E}ABC\mathcal{E}$ ЭДС батареи равна сумме напряжений на конденсаторах C_1 и C_2 :

$$\mathcal{E} = U_1 + U_2 = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2}.$$

Отсюда

$$q_1 = \mathcal{E} C_1 - \frac{q_2 C_1}{C_2}.$$

По закону сохранения заряда сумма зарядов трех обкладок конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 , соединенных в точке D , равна нулю. Если знак заряда на обкладке конденсатора C_3 совпадает со знаком заряда на обкладке конденсатора C_2 , то выполняется равенство

$$|q_1| = |q_2| + |q_3|.$$

В замкнутом контуре $BCDB$ нет источника ЭДС, напряжение на резисторе R_2 равно сумме напряжений на обкладках конденсаторов C_3 и C_2 :

$$U_{BC} = U_{BD} + U_{DC}.$$

Так как знаки зарядов на обкладках конденсаторов C_2 и C_3 , соединенных в точке D , одинаковы, то

$$U_{BC} = \frac{q_2}{C_2} - \frac{q_3}{C_3}.$$

Отсюда

$$q_2 = U_{BC} C_2 + q_3 \frac{C_2}{C_3}$$

и

$$q_1 = \mathcal{E} C_1 - U_{BC} C_1 - q_3 \frac{C_1}{C_3}.$$

Подставляя в уравнение $q_1 = q_2 + q_3$ найденные выражения для q_2 и q_3 , получим:

$$\mathcal{E} C_1 - U_{BC} C_1 - q_3 \frac{C_1}{C_3} = U_{BC} C_2 + q_3 \frac{C_2}{C_3} + q_3,$$

$$q_3 \left(\frac{C_1}{C_3} + \frac{C_2}{C_3} + 1 \right) = \mathcal{E} C_1 - U_{BC} C_1 - U_{BC} C_2,$$

$$q_3 = \frac{\mathcal{E} C_1 - U_{BC} (C_1 + C_2)}{\frac{C_1}{C_3} + \frac{C_2}{C_3} + 1} = \frac{\mathcal{E} C_1 - \frac{R_2 \mathcal{E}}{R_1 + R_2} (C_1 + C_2)}{\frac{C_1}{C_3} + \frac{C_2}{C_3} + 1}.$$

Пример 25. Аккумулятор с ЭДС, равной 9 В, и внутренним сопротивлением 0,2 Ом заряжается от генератора с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 0,1 Ом. Параллельно аккумулятору включена электрическая лампа сопротивлением 2 Ом. Определите силу тока в цепи генератора и в цепи лампы.

Решение. Схема включения генератора, аккумулятора и лампы представлена на рисунке 133, где $\mathcal{E}_1$ — ЭДС генератора, r_1 — его внутреннее сопротивление, $\mathcal{E}_2$ — ЭДС аккумулятора, r_2 — его внутреннее сопротивление, R — сопротивление лампы.

Предположим, что токи в цепи имеют направления, указанные на рисунке 133. Сумма ЭДС источников в любом замкнутом контуре равна сумме падений напряжения на элементах этой цепи. На этом основании с учетом направления токов и полярности включения источников можно составить уравнение:

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = I_1 r_1 + I_2 r_2,$$

$$\mathcal{E}_1 = I_3 R + I_1 r_1.$$

По первому правилу Кирхгофа сумма токов в узле должна быть равной нулю, или

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

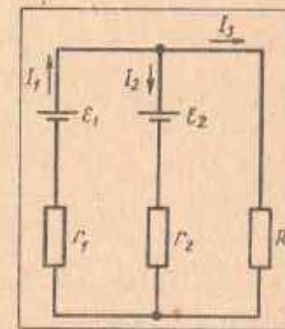


Рис. 133

Решая систему уравнений, получаем:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 &= I_1 r_1 + (I_1 - I_3) r_2, \\ I_3 &= \frac{\mathcal{E}_1 - I_1 r_1}{R}, \\ \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 &= I_1 r_1 + I_1 r_2 - (\mathcal{E}_1 - I_1 r_1) \frac{r_2}{R}, \\ I_1 &= \frac{R(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2) + \mathcal{E}_1 r_2}{R(r_1 + r_2) + r_1 r_2}, \\ I_1 &= \frac{2 \text{ Ом} \cdot 3 \text{ В} + 12 \text{ В} \cdot 0,2 \text{ Ом}}{2 \text{ Ом} \cdot 0,3 \text{ Ом} + 0,02 \text{ Ом}} \approx 13,55 \text{ А}, \\ I_3 &= \frac{12 \text{ В} - 13,55 \text{ А} \cdot 0,1 \text{ Ом}}{2 \text{ Ом}} \approx 5,32 \text{ А}.\end{aligned}$$

Пример 26. Используя закон Био — Савара — Лапласа, вычислите индукцию магнитного поля, создаваемого током I при прохождении по проводнику, имеющему форму окружности радиусом R (в центре окружности).

Решение. Выбирая элемент проводника Δl_1 малым, можно считать его прямолинейным и перпендикулярным к прямой, соединяющей его с центром окружности (рис. 134). При этом условии угол α в выражении (27.13) равен 90° . Получаем:

$$B_1 = k' \frac{I \Delta l_1}{R^2}.$$

Аналогичные выражения определяют индукцию магнитного поля, создаваемого в центре окружности другими элементами проводника: $\Delta l_2, \Delta l_3, \dots, \Delta l_n$. Индукцию магнитного поля $\vec{B}$, создаваемого всем круговым током, можно найти суммированием векторов индукции отдельных элементов проводника с током $\Delta l_1, \Delta l_2, \dots, \Delta l_n$. Все эти векторы параллельны, поэтому модуль 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.

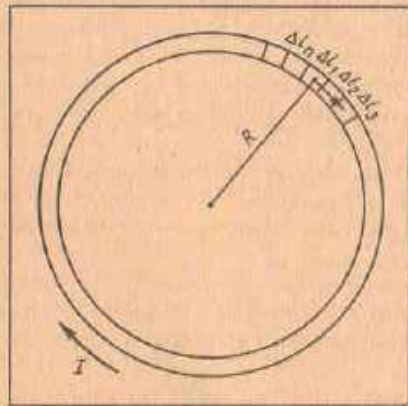


Рис. 134

Пример 27. В МГД-генераторе используется электронно-ионная плазма с концентрацией носителей заряда $6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, летящих со скоростью 1000 м/с . Индукция магнитного поля 2 Тл . Расстояние между катодом и анодом $0,5 \text{ м}$. Определите наибольшее напряжение и наибольшую силу тока, которые можно получить от данного МГД-генератора, если сечение канала $0,25 \text{ м}^2$.

Решение.

$$\begin{aligned}n &= 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \\ v &= 10^3 \text{ м/с} \\ B &= 2 \text{ Тл} \\ d &= 0,5 \text{ м} \\ S &= 0,25 \text{ м}^2\end{aligned}$$

$$U - ? \quad I - ?$$

Наибольшее напряжение получается в режиме холостого хода, когда цепь нагрузки разомкнута. При этом выполняется соотношение $evB = eE$.

Поскольку $E = \frac{U}{d}$, то искомое напряжение равно:

$$U = dvB; \quad U = 0,5 \text{ м} \cdot 10^3 \text{ м/с} \cdot 2 \text{ Тл} = 1000 \text{ В}.$$

Наибольшая сила тока получается в режиме короткого замыкания, когда сопротивление цепи нагрузки равно нулю. При этом сила тока будет равна: $I = envS$;

$$I = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \cdot 10^3 \text{ м/с} \cdot 0,25 \text{ м}^2 = 2400 \text{ А}.$$

Задачи для самостоятельного решения

Задача 32. Какая доля f атомов в звездах должна потерять электроны для того, чтобы силы кулоновского отталкивания положительно заряженных звезд компенсировали силы всемирного тяготения? Звезды считайте состоящими из водорода.

Задача 33. На параллельных металлических пластинах находятся электрические заряды $+q$ и $+3q$. Определите разность потенциалов между пластинами площадью S , если расстояние между ними d . Между пластинами находится воздух.

Задача 34. В пространство между двумя параллельными незаряженными пластинами вносится параллельно им пластина с плотностью электрического заряда σ . Определите разность потенциалов между пластинами, расстояние между которыми d .

Задача 35. Металлический шар радиусом r имеет электрический заряд q . Каким станет потенциал шара, если его внести внутрь металлической сферы радиусом R , изолированной от Земли, и коснуться им внутренней поверхности сферы?

Задача 36. Три металлические пластины расположены параллельно. На одной из крайних пластин имеется положительный заряд q , две другие нейтральны.

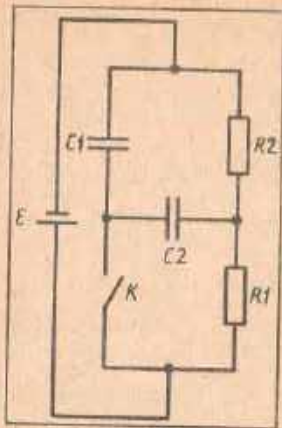


Рис. 135

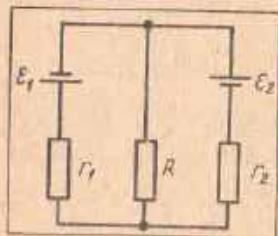


Рис. 136

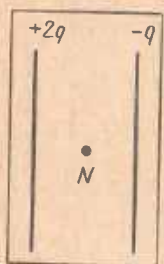
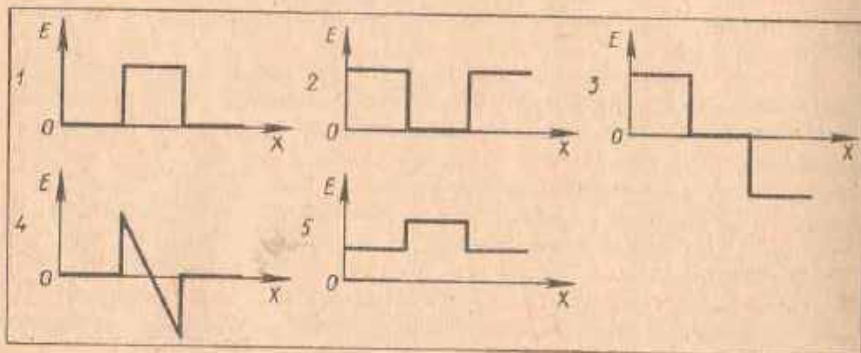


Рис. 137

Рис. 138↓



- 1) Какой заряд q_2 будет наведен на средней пластине, если ее соединить проводником с нейтральной?
2) Какой заряд q_2 будет на средней пластине, если соединить проводником все три пластины?

Задача 37. Определите, какой заряд Δq протечет через ключ K при его замыкании (рис. 135).

Задача 38. Параллельно амперметру включен резистор с электрическим сопротивлением $R_{ш}$, в n раз меньшим внутреннего сопротивления R_A прибора. Во сколько раз при этом изменяются показания прибора?

Задача 39. Последовательно с вольтметром включен резистор с электрическим сопротивлением R . Во сколько раз при этом изменяются показания вольтметра?

Задача 40. Две батареи с ЭДС $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$ и внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 включены, как показано на рисунке 136. Определите силу тока I_3 в проводнике с электрическим сопротивлением R .

Задание для самопроверки 3

1. Чему равна напряженность электрического поля в пространстве между двумя параллельно расположенными металлическими пластинами, несущими одноименные электрические заряды с поверхностной плотностью σ на каждой?

- А. 0. Б. $\frac{\sigma}{\epsilon_0}$. В. $\frac{\sigma}{2\epsilon_0}$. Г. $\frac{2\sigma}{\epsilon_0}$. Д. $\frac{4\sigma}{\epsilon_0}$.

2. Две параллельные металлические пластины площадью S имеют разноименные заряды $+2q$ и $-q$. Чему равна напряженность электрического поля в точке N (рис. 137)?

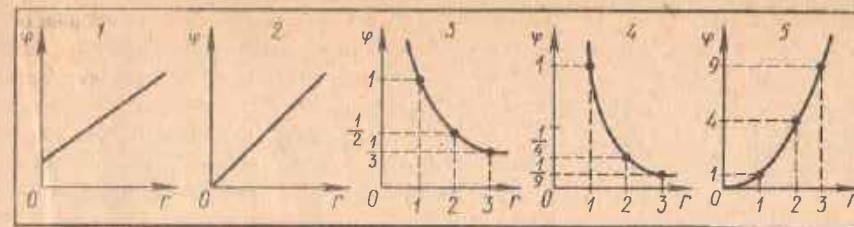


Рис. 139↑

- А. $\frac{q}{2S\epsilon_0}$. Б. $\frac{q}{S\epsilon_0}$. В. $\frac{3q}{S\epsilon_0}$. Г. $\frac{3q}{2S\epsilon_0}$. Д. $\frac{q}{3S\epsilon_0}$.

3. Какой из графиков (рис. 138) показывает зависимость от расстояния напряженности электрического поля двух плоскостей, заряженных разноименно с одинаковой плотностью зарядов? Направление оси Ox выбрано перпендикулярным пластинам конденсатора.

- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

4. Какой из приведенных ниже графиков (рис. 139) выражает зависимость потенциала φ электрического поля от расстояния r до точечного положительного заряда?

- А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

5. Металлическому полному телу, сечение которого представлено на рисунке 140, сообщен некоторый положительный заряд. Каково соотношение между потенциалами точек 1, 2, 3?

- А. $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3$. Б. $\varphi_1 = \varphi_2 > 0$, $\varphi_3 = 0$. В. $\varphi_3 > \varphi_1 > \varphi_2$. Г. $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$. Д. $\varphi_2 > \varphi_1 > 0$, $\varphi_3 = 0$.

6. Как изменятся напряженность и потенциал электрического поля заряда q в точке A , если в точке B поместить шар из диэлектрика (рис. 141)?

А. Напряженность и потенциал электрического поля в точке A увеличатся. Б. Напряженность увеличится, потенциал уменьшится. В. Напряженность уменьшится, потенциал увеличится. Г. Напряженность и потенциал уменьшатся. Д. Напряженность и потенциал останутся без изменения.

7. В пространстве между пластинами воздушного конденсатора напряженность электрического поля E_0 . Конденсатор отключен от источника тока. После внесения в это пространство пластины из металла внутри металла устанавливается напряженность E_1 , а в воздушной прослойке напряженность E_2 (рис. 142). Каково

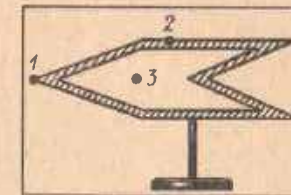


Рис. 140



Рис. 141

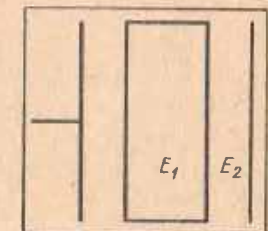


Рис. 142

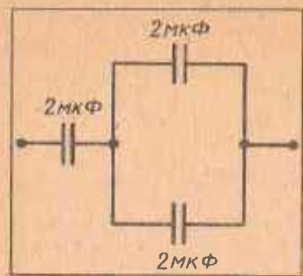
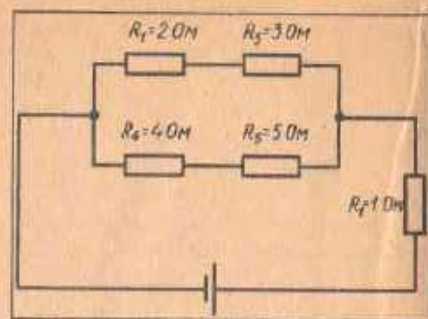


Рис. 143

Рис. 144



соотношение между значениями напряженностей E_0 , E_1 и E_2 ?

А. $0 < E_1 < E_0$, $E_2 = E_0$. Б. $E_1 = 0$, $E_2 = E_0$. В. $0 < E_1 < E_0$, $E_2 > E_0$. Г. $E_1 = 0$, $E_2 > E_0$. Д. $E_1 = E_2 = E_3$.

8. Чему равна емкость системы конденсаторов, изображенной на рисунке 143?

А. $2/3$ мкФ. Б. $4/3$ мкФ. В. $3/4$ мкФ. Г. 3 мкФ. Д. 6 мкФ.

9. Конденсатор, емкость которого равна C , а заряд q , подключили параллельно к незаряженному конденсатору такой же емкости. Чему равна энергия электрического поля системы из двух конденсаторов?

А. $\frac{q^2}{C}$. Б. $\frac{q^2}{2C}$. В. $\frac{q^2}{4C}$. Г. $\frac{q^2}{8C}$. Д. Ни один из приведенных результатов не является правильным.

10. На рисунке 144 представлена схема электрической цепи из источника постоянного тока и пяти резисторов. На каком из резисторов выделяется наибольшее количество теплоты в единицу времени?

А. На R_1 . Б. На R_2 . В. На R_3 . Г. На R_4 . Д. На R_5 .

11. Какой из приведенных на рисунке 145 графиков соответствует вольт-амперной характеристике лампы накаливания?

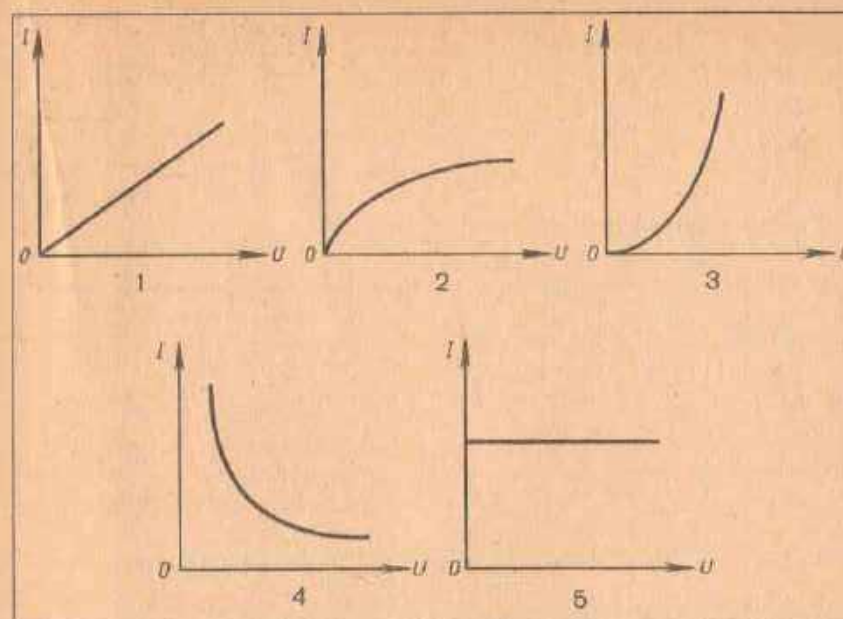
А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

12. Рассчитайте силу тока через амперметр в схеме, приведенной на рисунке 146. Укажите направление тока через него. Амперметр идеальный.

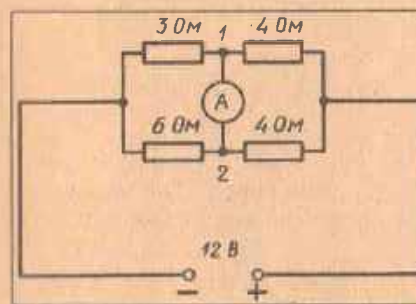
А. 0 А. Б. 0,5 А, направление 1—2. В. 1 А, направление 2—1. Г. 1 А, направление 1—2. Д. 0,5 А, направление 2—1.

13. Два одинаковых источника тока с ЭДС $\mathcal{E}$ каждый соединены последовательно. Чему равны показания вольтметра с большим внутренним сопротивлением, подключенного к точкам А и В (рис. 147)?

А. $\mathcal{E}$. Б. $2\mathcal{E}$. В. $\frac{\mathcal{E}}{2}$. Г. $\frac{\mathcal{E}}{2}$. Д. 0.



↑ Рис. 145



← Рис. 146

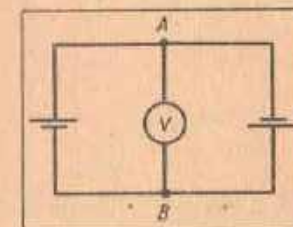


Рис. 147

14. В цепи, изображенной на рисунке 148, ползунок реостата переместили вверх. Как изменились при этом накал лампы и показания вольтметра?

А. Накал лампы увеличился, показания вольтметра не изменились. Б. Накал лампы увеличился, показания вольтметра уменьшились. В. Накал лампы и показания вольтметра увеличились. Г. Накал лампы и показания вольтметра уменьшились. Д. Накал лампы уменьшился, показания вольтметра увеличились.

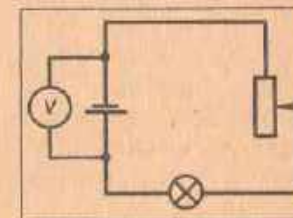


Рис. 148

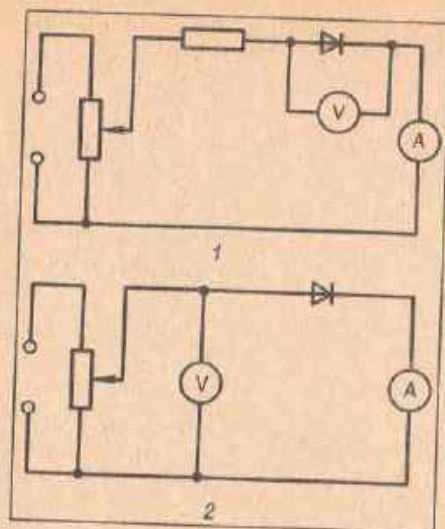


Рис. 149

15. Какую из схем на рисунке 149 следует предпочесть для исследования зависимости прямого тока диода от напряжения и какую для исследования зависимости обратного тока диода от напряжения?

А. Для обоих случаев следует выбрать схему 1. Б. Для обоих случаев следует выбрать схему 2. В. Для исследования зависимости прямого тока диода от напряжения следует выбрать схему 1, для обратного тока — схему 2. Г. Для исследования зависимости прямого тока диода от напряжения следует выбрать схему 2, для обратного — схему 1. Д. Не знаю.

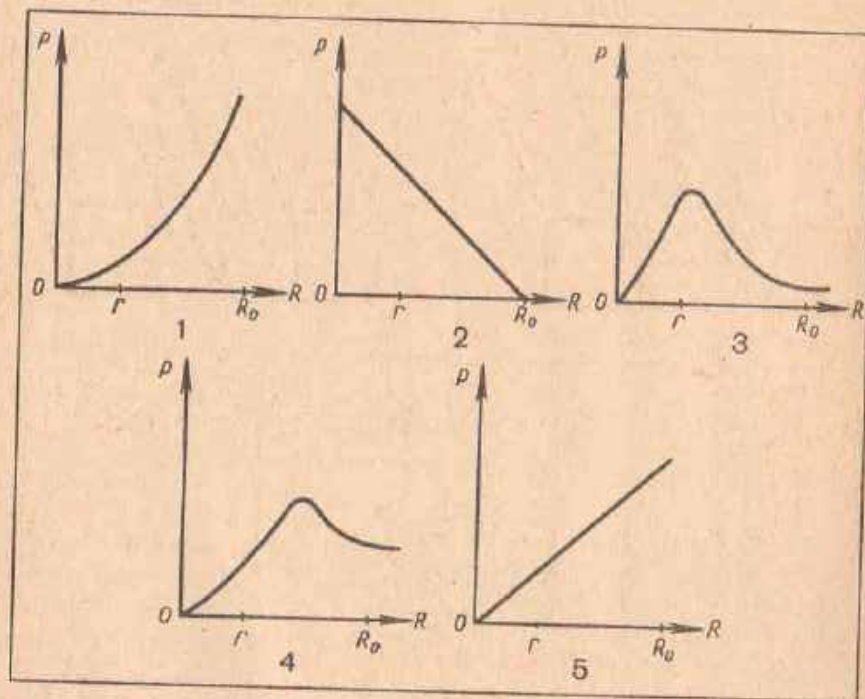


Рис. 150

16. Источник постоянного тока с внутренним сопротивлением r подключили к переменному резистору с максимальным значением сопротивления R . Какой из графиков (рис. 150) правильно отражает зависимость мощности P , выделяемой на переменном резисторе, от его электрического сопротивления R ?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. 5.

17. Какое из приводимых ниже соотношений выполняется для сил токов, протекающих через базовый I_b , коллекторный I_k и эмиттерный I_z выводы транзистора?

А. $I_z = I_k \gg I_b$. Б. $I_z < I_k \gg I_b$. В. $I_z > I_b \gg I_k$. Г. $I_b > I_z \gg I_k$. Д. $I_z > I_k \gg I_b$.

18. Рамка из металла вращается по часовой стрелке в однородном магнитном поле (рис. 151). Каково направление тока на участке CD в положениях 1 и 2?

А. 1 — от C к D , 2 — $I = 0$. Б. 1 — от D к C , 2 — от C к D . В. 1 — $I = 0$, 2 — от D к C . Г. 1 — от D к C , 2 — $I = 0$. Д. 1 — $I = 0$, 2 — от C к D .

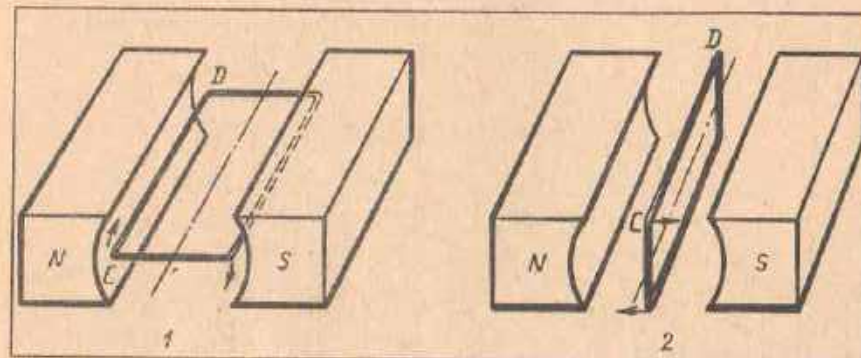
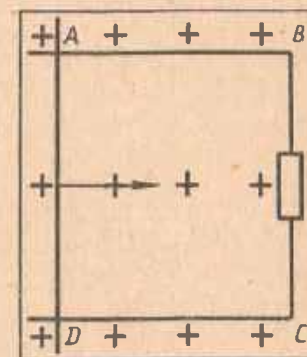


Рис. 151 ↑

Рис. 152 →



19. По параллельным металлическим проводникам, расположенным в однородном магнитном поле, с постоянной скоростью перемещается перемычка AD (рис. 152). Вектор индукции магнитного поля $\vec{B}$ перпендикулярен плоскости $ABCD$. Какой из графиков на

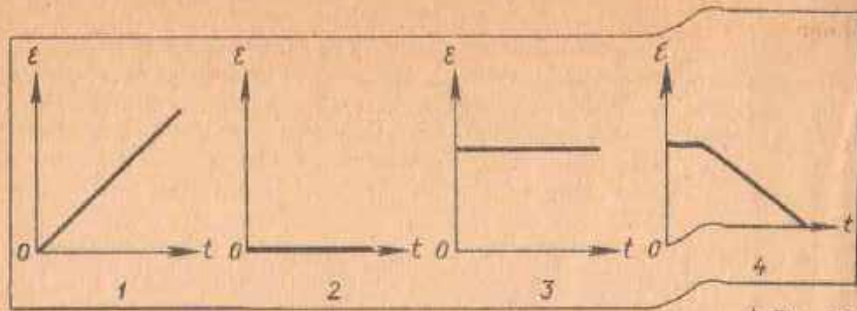
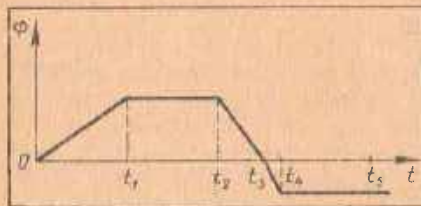


Рис. 154 ↓



рисунке 153 выражает зависимость ЭДС индукции в цепи от времени?

А. 1. Б. 2. В. 3. Г. 4. Д. Ни один из приведенных ответов не является правильным.

20. Магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется со временем, как показано на графике (рис. 154). В какой промежуток времени модуль ЭДС индукции имеет максимальное значение?

А. 0 — t_1 . Б. t_1 — t_2 . В. t_2 — t_3 . Г. t_3 — t_4 . Д. t_4 — t_5 .

§ 31. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Задание 10. Измерение напряжений, силы тока и сопротивлений с помощью авометра

Изучите устройство и принцип действия универсального электроизмерительного прибора — ампервольтметра. Произведите измерения по инструкции, прилагаемой к прибору. С помощью прибора измерения постоянного напряжения, силы тока и сопротивления.

Оборудование: школьный авометр, источник постоянного напряжения 4—6 В, лампа низковольтная на подставке, три резистора с известными сопротивлениями, три резистора с неизвестными сопротивлениями, конденсатор бумажный, конденсатор электролитический, диод полупроводниковый, соединительные проводники.

Возможный вариант выполнения задания

1. Ознакомившись с устройством и принципом действия авометра по прилагаемой к нему инструкции, подготовьте прибор к измерениям постоянного напряжения 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 сопротивление 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 тока, резистора и амперметра. Сравните результаты измерений силы тока в цепи с расчетным значением. Результаты измерений и вычислений запишите в отчетную таблицу.

Задание 11. Регулирование силы тока и напряжения в цепях постоянного тока

Оборудование: источник постоянного тока, амперметр, вольтметр, переменный резистор, потенциометр, лампа низковольтная на подставке.

Возможный вариант выполнения задания

Соберите сначала электрическую схему с низковольтной лампой, в которой сила тока может регулироваться с помощью переменного резистора (рис. 155), и измерьте пределы изменения силы тока в цепи и напряжения на лампе. Затем соберите схему, в которой напряжение на лампе регулируется с помощью потенциометра (рис. 156), и измерьте пределы изменения силы тока в цепи и напряжения на лампе.

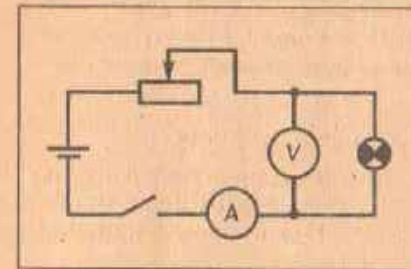


Рис. 155

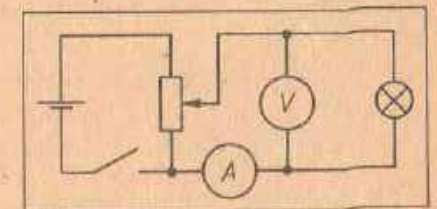


Рис. 156

З а д а н и е 12. Измерение рабочих параметров электромагнитного реле

Используя предложенное оборудование, определите сопротивление обмотки реле, напряжение и силу тока срабатывания и отпускания электромагнитного реле.

Оборудование: источник постоянного тока, потенциометр, электромагнитное реле, лампа низковольтная на подставке.

У к а з а н и я. Простейшее электромагнитное реле имеет катушку с ферромагнитным сердечником, якорь, замыкающие контакты (КЗ) и размыкающие контакты (КР) (рис. 157).

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.

Силу тока в обмотке реле, при которой электромагнитное усилие превышает силу упругости возвратной пружины и якорь реле притягивается к сердечнику, называют током срабатывания $I_{ср.б.}$

Притяжение якоря 10 к сердечнику реле вызывает перемещение штифта 6, изготовленного из изолятора. Штифт 6 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 6 возвращается в исходное положение, контакты 7 КЗ размыкаются, контакты КР 8 замыкаются.

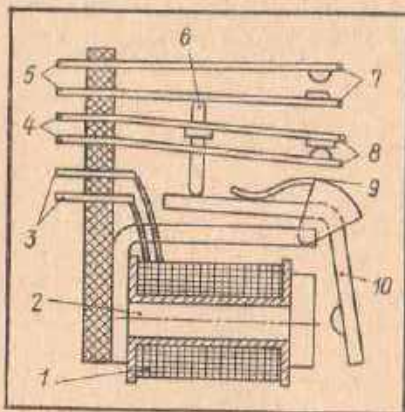


Рис. 157

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 $I_{ср.б.}$

Силу тока, при которой действие возвратной пружины преодолевает действие электромагнитного притяжения и происходит возвращение якоря в первоначальное положение, называют током отпускания $I_{отп.}$

Условные обозначения обмотки и контактов электромагнитного реле на принципиаль-

ных электрических схемах представлены на рисунке 158.

Характеристики выше рассмотренного типа реле не зависят от направления тока в обмотке. Такие реле называют *нейтральными*. Электромагнитные реле, токи срабатывания и отпускания которых зависят от направления тока в обмотке, называют *поляризованными* реле.

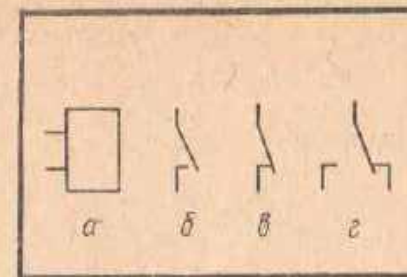


Рис. 158

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 воспользо-

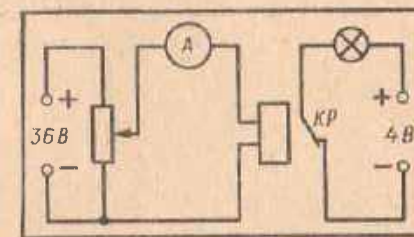


Рис. 159

ваться омметром. Обмотка реле обычно имеет электрическое сопротивление от сотен ом до нескольких килоом; между выводами размыкающих контактов КР в *нормальном состоянии* сопротивление реле равно нулю. Измерьте *сопротивление обмотки* реле.

2. Соберите электрическую *схему по рисунку 159*. 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 отпускания реле.

З а д а н и е 13. Определение параметров транзистора

Определите коэффициент усиления транзистора по току при включении по схеме с общим эмиттером.

Оборудование: транзистор, миллиамперметр на 30 мА, микроамперметр на 500 мкА, источник постоянного напряжения на 4 В, потенциометр сопротивлением 500 кОм, резистор сопротивлением 10—40 кОм.

У к а з а н и я. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки для измерения параметра β представлена на

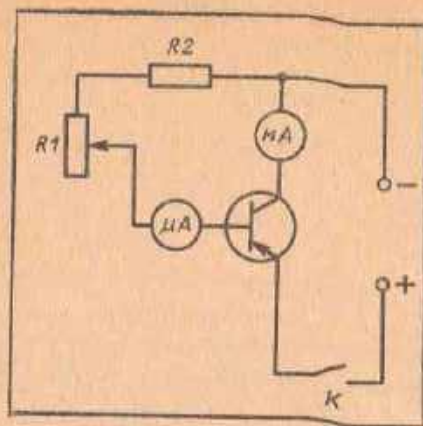


Рис. 160

рисунке 160. 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

$$K_T = \frac{\Delta I_{\max}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \approx \frac{I_k}{I_b} \approx \beta.$$

В этой схеме ток базы I_b регулируют потенциометром R_1 сопротивлением 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 испытуемого транзистора подключите к электрической цепи, собранной на панели. Замкнув ключ K , подайте на схему постоянное напряжение 4 В от источника питания.
3. С помощью потенциометра R_1 установите силу тока базы $I_b = 100$ мкА.
4. Измерьте силу тока коллектора I_k и определите коэффициент усиления транзистора по току β в схеме включения с общим эмиттером.
5. Повторите измерения и вычисления для значений силы тока базы 200 и 300 мкА.

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

1. $n = 3,6 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$; $p = 1,4 \text{ Па}$; $p = 1,7 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^3$. 3. $p_2 = 8,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$. 4. $\frac{v_2}{v_1} = 2$. 5. При $n > 1$ T — уменьшается; $n < 1$ T — увеличивается; $n = 1$, $T = \text{const}$. 6. $p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}$. 7. $m = 190 \text{ кг}$, $T = 4350 \text{ К}$. 8. $p = 1,7 \cdot 10^{-15} \text{ Па}$, $\lambda \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ м}$, $\tau \approx 2 \cdot 10^{10} \text{ с} \approx 700 \text{ лет}$. 9. $p = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. 10. $p = 750 \text{ мм рт. ст.}$. 11. $p' = \frac{3}{2} p$. 12. $\Delta l = \frac{p_0 S l}{2 m g}$. 13. $n = 2 \cdot 10^{17}$. 14. $\frac{m_1}{m} \approx 3 \cdot 10^{-3} = 0,3\%$. 17. $n = 25$. 18. $m = \frac{v R \Delta T}{h g} - \frac{p_0 S}{g}$. 19. $T = 250 \text{ К}$. 20. $m = 0,88 \text{ кг}$. 21. $\frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}} = 0,02$. 22. $T = 500 \text{ К}$. 23. $\eta = 2/23$. 24. $\eta = 43\%$. 25. $\eta = 52\%$. 26. $\eta = 35\%$. 27. $\eta = 61\%$. 28. $Q = 450 \text{ Дж}$. 29. $T_2 = 330 \text{ К}$. 30. $h = \frac{2}{5} h_0 + \frac{3}{5} v \frac{R T}{m g} = 1,1 \text{ мм}$. 31. $\eta_1 > \eta_2$. 32. $f = \frac{m_0}{l} \sqrt{\frac{G}{K}} \approx 10^{-8}$. 33. $\Delta \varphi = \frac{q d}{S \epsilon_0}$. 34. $\Delta \varphi = \frac{\sigma}{2 \epsilon_0}$. 35. $\varphi = k \frac{q}{R}$. 36. 1) $q_2 = \frac{q}{2}$; 2) $q_2 = 0$. 37. $\Delta q = \frac{\mathcal{E} C_1 (R_1 + R_2) + \mathcal{E} R_1 C_2}{R_1 + R_2}$. 38. $\frac{I}{I_A} = 1 + n$. 39. $\frac{V}{V_B} = 1 + n$. 40. $I_3 = \frac{\mathcal{E}_2 r_1 - \mathcal{E}_1 r_2}{R r_1 + R r_2 + r_1 r_2}$.

Задание для самопроверки 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
В	А	Б	Г	А	Д	В	В	Д	А	Б	В	Г	В	В

Задание для самопроверки 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Г	Г	Б	В	Б	Б	В	Б	Д	Г	В	Г	А	В	А

Задание для самопроверки 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
А	Г	А	В	А	Б	Г	Б	В	В	Б	Д	Д	Б	В	В	Д	А	В	Г

ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютная температура — 17
Абсолютный нуль температуры — 10
Авогадро А. — 4
Адиабатный процесс — 101
Ампер — 207
Ампер А. — 198
Анализ рентгеноструктурный — 43

Б

База транзистора — 194
Бойль Р. — 11
Больцман Л. — 16
Брегг В. Г. — 43, 44
Брегг В. Л. — 43, 44

В

Вероятность события — 137
Вечный двигатель — 94
Внутренняя энергия — 93, 94, 97
Вульф Ю. В. — 43, 45

Г

Газ идеальный — 19
— реальный — 20
— , сжижение — 31
Газовая постоянная молярная — 19
Гаусса теорема — 166
Гей-Люссак Ж. — 4, 11
Генератор магнитогидродинамический — 209
Глушко В. П. — 130

Д

Давление газа — 12, 14
— идеального газа — 13, 15
Дальтон Д. — 4
Двигатель Ванкеля — 118
— вечный — 94
— внутреннего сгорания поршневой — 114
— Дизеля — 117
— карбюраторный — 115—117
— прямоточный воздушно-реактивный — 126
— пульсирующий воздушно-реактивный — 127
— ракетный — 128
— реактивный — 126
— тепловой — 105
— турбореактивный — 126
Дендриты — 52, 53

Дефекты в кристаллах — 50
Джоуль Д. — 12, 96
Диаграмма состояний вещества — 33
Диамagnetизм — 212
Дислокация — 51
Диффузия в газах — 23
Диэлектрики — 183
Диэлектрическая проницаемость вещества — 174
Длина свободного пробега — 21, 23
Домены — 215
Дроссель — 142
Дросселирование адиабатное — 142
Дюлонг П. — 103

Ж

Жидкие кристаллы — 63, 65

З

Зажигание факельное — 120
Закон Ампера — 206, 207
— Бю — Савара — Лапласа — 204, 205
— Бойля — Мариотта — 11
— броуновского движения — 27
— Гей-Люссак — 11
— Дальтона — 4, 11
— Кулона — 163
— Ома для участка цепи — 171, 172
— постоянства внутренней энергии — 93
— равнораспределения — 100
— сохранения и превращения энергии — 93
— электрического заряда — 163
— термодинамики первый — 94
— второй — 135
— Шарля — 11

Закономерность статистическая — 137

И

Индикаторы буквенно-цифровые — 66
Индукция бесконечного прямого проводника с током — 208
— магнитная кругового тока — 205
— магнитного поля — 201, 203
— в центре кругового тока — 208
Индукция магнитного поля движущегося электрического заряда — 208
Иоффе А. Ф. — 57

К

Каналирование частиц — 45, 46
Капица П. Л. — 143, 145
Карно С. — 109
Клаузиус Р. — 12
Количество теплоты — 93, 94
Коллектор — 194
Королев С. П. — 130

Коэффициент полезного действия
— идеальной тепловой машины — 110
— паровой машины — 114
— паротурбинной установки — 123
— теплового двигателя — 108
— усиления каскада по напряжению — 197
— транзистора по току — 197
Кристаллы жидкие — 63, 65
— , строение — 37
Кристаллизация — 54, 55
— в невесомости — 61
Круговой процесс — 107
Курчатов И. В. — 177

Л

Линии напряженности электрического поля — 165
Ломоносов М. В. — 10, 38

М

Магниты постоянные — 215
Максвелл Дж. — 15, 28
Мариотт Э. — 11
Машина Линде — 142
— паровая — 112
— холодильная — 141
МГД-генератор — 209
Метод теней — 46
— термодинамический — 91

Молекула, размер — 7
— , распределение по скоростям — 27
Монокристаллы — 53, 56

Н

Начало термодинамики первое — 93
— второе — 135
Напряжение электрическое — 171
Напряженность поля заряженной плоскости — 167

Напряженность электрического поля — 164

П

Парамагнетизм — 213
Паровая машина И. И. Ползунова — 112
Перрен Ж. — 27
Плотная упаковка — 38, 41
Поле магнитное — 201
— электрическое — 164
— электромагнитное — 209
Ползунов И. И. — 112, 113
Полупроводники — 183
— , $p-n$ -переход — 190
Поляризация спонтанная — 176
Постоянная Авогадро — 5
— Больцмана — 18
— газовая молярная — 19
— кристаллической решетки — 43
— магнитная — 208
Потенциал электрического поля — 169
— системы — 171
— точечного заряда — 168

Правило Кирхгофа первое — 172
— второе — 173
— левой руки — 207

Примеси акцепторные — 186
— донорные — 186

Принцип суперпозиции — 164
Проводимость дырочная — 185
Протектор ионный — 47
— электронный — 47

Проницаемость вещества диэлектрическая — 174

Пространственная решетка — 40, 41

Протонография — 46

Процесс адиабатный — 101
— круговой — 107
— термодинамический — 92
— циклический — 107

Пти А. — 103

Р

Работа в термодинамике — 93
— идеального газа — 100
— по перемещению заряда — 172
— электрического поля — 169, 170
Рабочий цикл теплового двигателя — 105
— холодильной машины — 141
Разность потенциалов — 172
Решетка пространственная — 40
Ротор — 119

С

- Свойства вещества магнитные — 212
 - жидкостей — 31
 - p — n -перехода — 190
- Сегнетоэлектрики — 176, 177
- Сжижение газов — 31
- Сила Лоренца — 209
 - магнитного взаимодействия — 200, 208
- Система термодинамическая — 92
- Сублимация — 33

Т

- Температура абсолютная — 17
 - низкая — 142
 - Кюри — 178
- Теорема Гаусса — 166
- Теория близкодействия — 201
 - газов кинетическая — 10
 - молекулярно-кинетическая — 9, 91
- Тепловой двигатель — 105
- Теплоемкость вещества удельная — 95
 - идеального газа — 96
 - многоатомных газов — 99
 - молярная — 101
 - твердых тел — 102
- Теплота сгорания топлива удельная — 132
- Термистор — 188
- Термодинамика — 92
- Термодинамическая система — 92
- Термодинамический процесс — 92
- Термометр газовый — 16
- Термоэлемент — 193
- Тесла — 202
- Точка Кюри — 177, 215
 - тройная — 34
- Транзистор — 194
 - , усилительные свойства — 196
- Триод полупроводниковый — 194
- Турбина газовая — 123
 - паровая — 121
- Турбодетандер — 143

У

- Уатт Д. — 112, 113
- Уравнение адиабаты — 102
 - Ван-дер-Ваальса — 19, 21

- Клаузиуса — 14
- Менделеева — Клапейрона — 19
- Пуассона — 100
- состояния идеального газа — 20
- теплового баланса — 95
- Удельная теплоемкость идеального газа — 100
- теплота сгорания топлива — 132

Ф

- Федоров Е. С. — 42
- Фоторезистор — 188
- Ферромагнетизм — 214, 215
- Фотоэлемент — 193

Х

- Характеристика электрического поля энергетическая — 169
- Холодильник — 140

Ц

- Центр симметрии кристалла — 42
- Цикл Карно — 109
- Циолковский К. Э. — 129

Ш

- Шарль Ж. — 11
- Штерн О. — 27

Э

- Эквивалент теплоты механический — 95
- Электреты — 175
- Эмиттер — 194
- Энергия внутренняя — 93, 94, 97
 - кинетическая — 17
 - потенциальная — 169, 170
 - , распределение по степеням свободы — 98
- Энергетическая характеристика поля — 169
- Эрстед Г. Х. — 198
- Эффект Баркгаузена — 177
 - Джоуля — Томсона — 142
 - пьезоэлектрический — 178

Я

- Ячейка элементарная — 40

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

Глава I. Строение и превращения вещества

§ 1. Атомы и молекулы	3
§ 2. Молекулярно-кинетическая теория	9
§ 3. Температура как мера средней кинетической энергии молекул	16
§ 4. Реальные газы	19
§ 5. Решающие эксперименты молекулярно-кинетической теории	26
§ 6. Превращения вещества	30
§ 7. Строение кристаллов	37
§ 8. Экспериментальные методы изучения внутреннего строения кристаллов	43
§ 9. Получение и применение кристаллов	50
§ 10. Жидкие кристаллы	63
§ 11. Практикум по решению задач	68
§ 12. Экспериментальные задания	80

Глава II. Термодинамика

§ 13. Термодинамический метод	91
§ 14. Теплоемкость газов, жидкостей и твердых тел	94
§ 15. Тепловые двигатели	104
§ 16. Физические основы работы тепловых машин	112
§ 17. Второй закон термодинамики	133
§ 18. Холодильные машины	140
§ 19. Практикум по решению задач	145
§ 20. Экспериментальные задачи	159

Глава III. Электродинамика

§ 21. Электрическое поле	163
§ 22. Электрические цепи	171
§ 23. Диэлектрики и проводники в электрическом поле	174
§ 24. Электропроводность твердых тел	179
§ 25. Свойства p — n -перехода	190
§ 26. Транзистор	194
§ 27. Магнитное взаимодействие движущихся электрических зарядов	198
§ 28. Действие магнитного поля на движущиеся электрические заряды	206
§ 29. Магнитные свойства вещества	212
§ 30. Практикум по решению задач	216
§ 31. Экспериментальные задания	230

Ответы к задачам	235
Предметно-именной указатель	236

Олег Федорович Кабардин
Светлана Ильинична Кабардина
Никодим Иванович Шефер

ФАКУЛЬТАТИВНЫЙ КУРС ФИЗИКИ

9 класс

Зав. редакцией *Н. В. Хрусталь*
Редактор *А. И. Юдина*
Младший редактор *Т. Л. Верпаховская*
Художники *С. Ф. Лухин, А. Ф. Сысоев*
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*
Технический редактор *Е. Н. Зелянина*
Корректор *Н. В. Бурдина*

ИБ № 9159

Сдано в набор 28.06.85. Подписано к печати 14.01.86. Формат 60×90¹/₁₆. Бум. офсетная № 2. Гарнит. литер. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,0+0,25 форз.+0,125 вкл. Усл. кр.-отт. 16,82. Уч.-изд. л. 15,50+0,46 форз. +0,12 вкл. Тираж 130 000 экз. Заказ № 574. Цена 60 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано с диапозитивов ордена Трудового Красного Знамени фабрики «Детская книга» № 1 Росглавополиграфпрома Государственного комитета РСФСР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 127018, Москва, Сущевский вал, 49 по Калининскому ордену Трудового Красного Знамени полиграфоиздательской детской литературы им. 50-летия СССР Росглавополиграфпрома Госизмиздата РСФСР. 170040, Калинин, проспект 50-летия Октября, 46.

