

MINISTERUL EDUCAȚIEI AL REPUBLICII MOLDOVA

---

**Михай МАРИНЧУК  
Спиридон РУСУ**

# Физика

Учебник для 11 класса

**11**

---

Știința, 2014

CZU 53 (075.3)  
M 26

Elaborat conform curriculumului disciplinar în vigoare și aprobat prin Ordinul ministrului educației (nr. 608 din 06 iunie 2014). Editat din sursele financiare ale *Fondului Special pentru Manuale*.

**Contribuția autorilor la elaborarea manualului:**

*Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu* – capitolele II, IV, V.

*Spiridon Rusu* – capitolele I, III.

**Comisia de evaluare:** *Valeriu Canțer*, academician, Academia de Științe a Moldovei; *Eleodor Lupașcu*, doctor în fizică, conferențiar, Universitatea Agrară de Stat din Moldova; *Vladimir Ghețu*, profesor școlar, grad didactic superior, Liceul Teoretic „George Meniuc”, Chișinău

**Recenzenți:** *Mihai Șleahțișchi*, doctor în psihologie și pedagogie, conferențiar universitar, Universitatea Liberă Internațională din Moldova; *Alexei Colîbneac*, maestru în arte, profesor universitar, Academia de Muzică, Teatru și Arte Plastice; *Tatiana Cartaleanu*, doctor în filologie, conferențiar universitar, Universitatea Pedagogică de Stat „Ion Creangă”; *Ion Geru*, doctor habilitat în științe fizico-matematice, profesor universitar, membru corespondent al AȘM; *Simion Bâncilă*, doctor în fizică, profesor universitar, Universitatea de Stat „Alecu Russo”, Bălți

**Traducere din limba română:** *Anatolie Homenco, Claudia Șerban*

**Redactor:** *Valentina Ribalchina*

**Lector:** *Claudia Șerban*

**Corector:** *Tatiana Bolgar*

**Redactor tehnic:** *Nina Duduciuc*

**Machetare computerizată:** *Anatol Andrișchi*

**Copertă:** *Eduard Toacă*

**Întreprinderea Editorial-Poligrafică ȘTIINȚA,**

str. Academiei, nr. 3; MD-2028, Chișinău, Republica Moldova;

tel.: (+373 22) 73-96-16; fax: (+373 22) 73-96-27;

e-mail: prini@stiinta.asm.md; prini\_stiinta@yahoo.com; www.stiinta.asm.md

**DIFUZARE:**

**Republica Moldova:** ÎM Societatea de Distribuție a Cărții *PRO-NOI*

str. Alba-Iulia, nr. 75; MD-2051, Chișinău;

tel.: (+373 22) 51-68-17, 71-96-74; fax: (+373 22) 58-02-68;

e-mail: info@pronoi.md; www.pronoi.md

Toate drepturile asupra acestei ediții aparțin Întreprinderii Editoriale-Poligrafice *Știința*.

**Descrierea CIP a Camerei Naționale a Cărții**

Маринчук, Михай

**Физика:** Учебник для 11 кл./Михай Маринчук, Спиридон Русу; trad. din lb. rom.: Anatolie Homenco, Claudia Șerban; Min. Educației al Rep. Moldova. – Ch.: Î.E.P. *Știința*, 2014 (Tipogr. „BALACRON”). – 256 p.

ISBN 978-9975-67-945-9

53(075.3)

© *Mihai Marinciuc, Spiridon Rusu*. 2008, 2014

© Traducere: *Anatolie Homenco*, 2008;  
*Claudia Șerban*, 2008, 2014

© Întreprinderea Editorial-Poligrafică *Știința*.  
2008, 2014

ISBN 978-9975-67-945-9

# СОДЕРЖАНИЕ<sup>1</sup>

## ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

### Глава I. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

1.1. Термодинамическая система. Параметры состояния .....	8
1.2. Основные положения молекулярно-кинетической теории. Дискретная структура вещества .....	10
1.3. Силы взаимодействия молекул. Потенциальная и кинетическая энергии молекул .....	14
1.4. Модели твердого, жидкого и газообразного состояний вещества в молекулярно-кинетической теории .....	16
1.5. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа .....	18
1.6. Температура. Температурные шкалы .....	22
1.7. Уравнение состояния идеального газа .....	24
1.8. Простые изменения состояния идеального газа	
а. Изотермический процесс .....	27
Лабораторная работа. Экспериментальная проверка закона Бойля–Мариотта ....	29
б. Изобарный процесс .....	30
в. Изохорный процесс .....	32
г. Законы Гей-Люссака и Шарля, выраженные через абсолютную температуру ...	33
д. Термическое уравнение состояния идеального газа .....	34
Тесты для итоговой оценки знаний	
Реальный профиль .....	43
Гуманитарный профиль .....	45

### Глава II. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

2.1. Внутренняя энергия идеального газа	
а. Внутренняя энергия – функция состояния .....	47
б. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа .....	48
2.2. Работа газа в термодинамических процессах .....	51
2.3. Количество теплоты. Калорические коэффициенты .....	55

<sup>1</sup> Темы и различные виды заданий, отмеченные в учебнике знаком (\*), обязательны для реального профиля, ничем не отмеченные – обязательны как для реального профиля, так и для гуманитарного.

<b>2.4. Первый закон термодинамики и его применение к различным процессам</b>	
а. Первый закон термодинамики .....	57
б. Применение первого закона термодинамики к простым процессам идеального газа .....	59
<b>2.5. Тепловые двигатели. Коэффициент полезного действия (КПД)</b>	
а. Двигатели внутреннего сгорания .....	68
б. Принцип действия тепловых двигателей. КПД .....	70
в.* Холодильные машины .....	71
<b>2.6. Второй закон термодинамики</b>	
а.* Обратимые и необратимые процессы .....	74
б.* Второй закон термодинамики .....	76
в. Цикл Карно. Максимальное значение КПД .....	78
<b>2.7. Тепловые машины и защита окружающей среды</b> .....	81
<b>Тесты для итоговой оценки знаний</b>	
Реальный профиль .....	84
Гуманитарный профиль .....	86

### **Глава III. ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ**

<b>3.1.* Структура и основные свойства жидкостей</b> .....	88
<b>3.2.* Поверхностные явления</b>	
а. Поверхностный слой. Поверхностное натяжение .....	89
<b>Лабораторная работа.*</b> Изучение поверхностных явлений .....	93
б. Форма поверхностного слоя. Капиллярные явления .....	94
<b>3.3.* Структура и основные свойства твердых тел</b>	
а. Кристаллы .....	98
б. Аморфные тела .....	100
в. Жидкие кристаллы .....	101
<b>3.4.* Деформация твердых тел. Закон Гука</b> .....	103
<b>3.5.* Тепловое расширение твердых тел и жидкостей</b> .....	107
<b>3.6.* Парообразование и конденсация</b>	
а. Испарение. Ненасыщенные и насыщенные пары .....	111
б. Влажность воздуха. Измерение влажности .....	114
в. Кипение. Температура кипения .....	118
<b>3.7.* Плавление и отвердевание. Сублимация и десублимация</b> .....	122
<b>3.8.* Калориметрия. Уравнение теплового баланса</b> .....	127
<b>Лабораторная работа.*</b> Определение удельной теплоты плавления льда .....	131
<b>Тест для итоговой оценки знаний</b>	
Реальный профиль .....	133

# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

## Глава IV. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

4.1. Электрические заряды. Закон сохранения электрического заряда. Закон Кулона .....	136
4.2. Электрическое поле. Напряженность электрического поля .....	142
4.3. Работа электрического поля при перемещении точечного заряда. Электрический потенциал	
а. Электростатическое поле – поле потенциальное .....	148
б. Работа электрического поля. Электрический потенциал .....	150
в.* Эквипотенциальные поверхности .....	153
4.4. Проводники в электростатическом поле .....	157
4.5. Диэлектрики в электростатическом поле .....	160
4.6. Электрическая емкость. Конденсаторы	
а. Электрическая емкость конденсатора .....	166
б. Электрическая емкость плоского конденсатора .....	167
в.* Соединение конденсаторов .....	169
г.* Электрическая емкость уединенного проводника .....	171
4.7. Энергия электрического поля .....	175
4.8.* Движение заряженных частиц в однородном электрическом поле .....	179
Тесты для итоговой оценки знаний	
Реальный профиль .....	185
Гуманитарный профиль .....	187

## Глава V. ЭЛЕКТРОКИНЕТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

5.1. Электрический ток. Основные понятия	
а. Постоянный электрический ток. Сила тока .....	189
б. Условия существования постоянного электрического тока. Электродвижущая сила .....	190
5.2. Законы постоянного тока	
а. Закон Ома для однородного участка цепи. Электрическое сопротивление .....	193
б. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля .....	196
в. Закон Ома для полной цепи .....	198
5.3.* Измерение силы тока и электрического напряжения. Потенциометр	
а.* Измерение силы тока. Шунт к амперметру .....	205
б.* Измерение электрического напряжения. Добавочное сопротивление .....	206
в.* Потенциометр .....	207
5.4.* Электроизмерительные приборы	
а.* Классификация и характеристика электроизмерительных приборов .....	209
б.* Погрешности электроизмерительных приборов .....	210
Лабораторная работа 1*. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока .....	212

Лабораторная работа 2*. Определение удельного сопротивления проводника ....	214
<b>5.5. Электрический ток в металлах</b>	
а. Электропроводность металлов .....	215
б.* Закон Ома в электронной теории металлов .....	216
в.* Закон Джоуля в электронной теории .....	218
г. Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры .....	218
д.* Сверхпроводимость .....	220
<b>5.6. Электрический ток в полупроводниках</b>	
а. Электрические свойства полупроводников .....	224
б. Свободные носители электрического заряда в полупроводниках. Собственная проводимость .....	225
в. Примесная проводимость полупроводников .....	227
г. $p$ - $n$ -переход. Полупроводниковый диод .....	228
д. Транзистор .....	230
<b>5.7. Электрический ток в электролитах</b>	
а. Электролитическая диссоциация. Носители электрического заряда в электролитах .....	232
б.* Электролиз. Законы Фарадея .....	233
в. Применения электролиза .....	235
<b>5.8. Электрический ток в газах</b>	
а. Несамостоятельный электрический разряд .....	238
б. Самостоятельный газовый разряд. Применения .....	241
в.* Плазма .....	243
<b>5.9. Электрический ток в вакууме</b>	
а. Термоэлектронная эмиссия. Вакуумный диод. Триод .....	244
б.* Электронно-лучевая трубка .....	246
<b>Тесты для итоговой оценки знаний</b>	
Реальный профиль .....	249
Гуманитарный профиль .....	251
<b>ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ</b> .....	253



# ТЕРМОДИНАМИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Существуют физические явления, которые невозможно объяснить с помощью изученных ранее законов классической механики. Например, переход вещества из одного агрегатного состояния в другое, явление теплопередачи при контакте тел с разной степенью нагрева, совершение механической работы за счет тепла, изменение физических свойств вещества при изменении температуры и многие другие. Все перечисленные явления имеют общий признак: они зависят от степени нагрева вещества, то есть от температуры, и называются **тепловыми явлениями**.

Для изучения тепловых явлений используются два взаимно дополняющих метода: **молекулярно-кинетическая теория**, или **статистическая физика**, и **термодинамика**.

# МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

## 1.1 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

**Макроскопические** тела (от греческого *makrós* – большой), тепловые свойства которых рассматриваются в молекулярно-кинетической теории и термодинамике, состоят из очень большого числа атомов и молекул. Последние являются **микроскопическими** составляющими (от греческого *mikrós* – маленький), которые, как будет показано далее, определяют тепловые свойства тел. Для описания термодинамических явлений одновременно были разработаны две теории.

**Молекулярно-кинетическая теория** изучает тепловые свойства различных физических систем, исходя из их микроскопической структуры, т.е. рассматривая как системы атомов и молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении. Микроскопические параметры исследуемых систем (масса атомов и молекул, скорость, импульс и их средняя энергия) определяют их макроскопические параметры. Например, давление и температура определяются свойствами системы молекул и нельзя говорить о давлении или температуре отдельной молекулы.

Термодинамика изучает тепловые свойства физических систем с макроскопической точки зрения, т.е. без учета их внутренней атомно-молекулярной структуры. В этом случае устанавливаются количественные соотношения между непосредственно наблюдаемыми величинами (давлением, объемом, температурой и т.д.), а с их помощью исследуется взаимодействие и обмен энергией между телами анализируемой системы и окружающей средой.

Тело или группу изучаемых макроскопических тел называют **термодинамической системой**. Входящие в эту систему тела могут взаимодействовать как между собой, так и с окружающими систему телами.

По характеру взаимодействия с внешней средой термодинамические системы подразделяются на:



– **открытые системы** – системы, в которых происходит обмен с внешней средой веществом и энергией. Например: масса кислорода уменьшается по мере выхода его из баллона; при испарении воды уменьшается ее масса в открытом сосуде и т.д.;

– **закрытые системы** – системы, в которых нет обмена веществом с внешней средой, но может быть обмен энергией. Например, газ в закрытом сосуде нагревается солнечным светом;

– **изолированные (замкнутые) системы** – системы, в которых не происходит обмена энергией и веществом с окружающей средой. Например, жидкость, находящаяся в плотно закрытом термосе.

Совокупность свойств системы молекул на данный момент времени определяет **состояние** системы. Измеряемые физические величины, описывающие конкретное состояние системы и характеризующие её свойства, называются **параметрами состояния**.

Выражение, устанавливающее связь между параметрами состояния, называется **уравнением состояния**.

Переход системы молекул из одного состояния в другое через ряд промежуточных состояний называется термодинамическим **процессом** или **превращением**.

Проанализируем введенные понятия с точки зрения справедливости уравнения состояния. С этой целью рассмотрим следующий пример. Предположим, что некоторый газ объемом  $V_1$ , находящийся в нормальных условиях ( $p_1 = 10^5$  Па,  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ), переходит из состояния 1 в состояние 2 с параметрами  $V_2$ ,  $p_2$  и  $t_2$ . В начальном состоянии, в отсутствие внешнего воздействия, газ описывается не изменяющимися во времени параметрами  $V_1$ ,  $p_1$  и  $t_1$ . В таких случаях говорят, что **состояние системы равновесное**. Равновесное состояние всегда можно изображать графически. Для этого используется система координат, по абсциссе и ординате которых отмечаются значения параметров состояния системы. Так, состояние равновесия 1 представлено на рисунке 1.1 точкой 1.

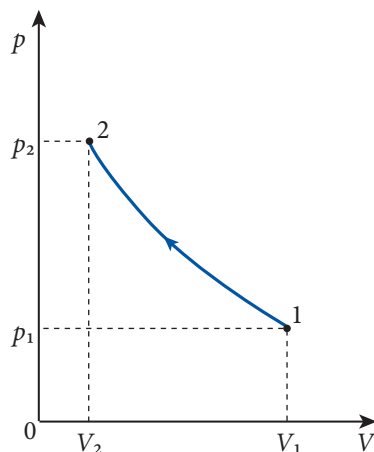


Рис. 1.1

Процесс, в течение которого система проходит ряд равновесных промежуточных состояний, называется **равновесным процессом**.

В таком случае, процесс перехода газа из начального состояния 1 в конечное 2 должен протекать достаточно медленно, чтобы газ практически находился все время в равновесном состоянии, то есть непрерывно переходил из одного состояния равновесия в другое.

Соответствующий процесс можно представить графически в виде кривой (рис. 1.1), а уравнение состояния описывает количественно это превращение.

Опыты показывают, что через определенное время **изолированная система обязательно переходит в состояние теплового равновесия**. Это утверждение известно как **нулевой закон термодинамики**.

1. Какие две теории были разработаны для описания термодинамических явлений? Охарактеризуйте их.
2. Чем отличаются замкнутые системы и изолированные?
3. Чем характеризуется состояние системы?
4. Что представляют собой параметры состояния?
5. Что представляет собой равновесное состояние, и при каких условиях оно реализуется? Приведите примеры.
6. Что называется равновесным тепловым процессом? Объясните возможность графического представления этого процесса.
7. Для экспериментального изучения равновесных процессов обязательным условием является как можно более медленное изменение параметров состояния. Объясните этот факт.

## 1.2 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ. ДИСКРЕТНАЯ СТРУКТУРА ВЕЩЕСТВА

Наличие различных агрегатных состояний вещества, а также сущность многих физических явлений могут быть поняты только при изучении внутреннего строения вещества. Экспериментальные данные, собранные в результате исследований, приводят к выводу, что вещество имеет дискретную структуру, то есть состоит из отдельных мелких частиц.

**Мельчайшая частица вещества, обладающая его химическими свойствами, называется молекулой.**

В свою очередь молекула состоит из еще более мелких частиц, одинаковых или различных, – **атомов**. Если атомы, образующие молекулу, одинаковы, то состоящее из них вещество, называется **простым**, его нельзя разложить на более простые составляющие (например, водород, хлор, железо и др.). Если молекулы состоят из различных атомов, то такое вещество называется **сложным**, его можно разложить на простые составляющие (например, углекислый газ, вода, поваренная соль и др.). Представление об атомарной структуре вещества возникло еще в древности (Левкипп, 490–430 гг. до Хр., Демокрит, 460–370 гг. до Хр. и др.), но теоретическое развитие атомистических идей стало возможным лишь после ряда экспериментальных доказательств, позволивших разработать такую теорию.

Физические явления: диффузия, испарение, кипение и другие показывают, что молекулы вещества находятся в непрерывном беспорядочном движении.

**При контакте двух веществ независимо от их агрегатного состояния происходит взаимное проникновение молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого без какого-либо воздействия извне. Это явление называется диффузией.**

Его можно объяснить, только предположив, что молекулы вещества беспорядочно движутся. Атмосфера Земли представляет собой смесь кислорода, азота, углекислого газа, паров воды и небольшого количества инертных газов. Если бы не существовало

непрерывного беспорядочного движения молекул, то под действием силы тяжести они оказались бы на поверхности Земли.

Решающую роль в экспериментальной проверке гипотезы о дискретной структуре вещества и беспорядочном движении молекул сыграло открытие движения, названного **броуновским**.

В 1827 году английский ботаник Роберт Броун, наблюдая в микроскоп взвесь пыльцы в воде, заметил, что частички пыльцы непрерывно и беспорядочно движутся, описывая самые причудливые траектории. Единственным внешним фактором, влияющим на это движение, была температура: чем она была выше, тем интенсивнее становилось движение. Позже было замечено, что так движутся и другие взвешенные частицы независимо от их природы. Австрийский физик Феликс Эренгафт (1879–1952) и французский физик Луи де Бройль (1892–1987) изучили движение частичек дыма в воздухе и обнаружили те же особенности их движения, что и у частичек пыльцы в воде. Беспорядочное движение очень мелких взвешенных частиц назвали **броуновским движением**, а соответствующие частицы – **броуновскими частицами**.

Долгое время броуновское движение не находило объяснений. Предлагались и проверялись различные гипотезы, но лишь в 1876 году английский физик У. Рамсей (1852–1916) предположил, что это явление можно объяснить только движением молекул жидкости, в которой находятся броуновские частицы. Эта гипотеза позволяет объяснить броуновское движение просто: движение частичек взвеси есть результат их столкновений с молекулами жидкости, при которых частицам передается определенный импульс.

Размеры броуновских частиц очень малы, но значительно больше размеров молекул. Число столкновений с различными участками поверхности броуновской частицы различно и результирующая полученного импульса может отличаться от нуля. Следовательно, броуновская частица движется в направлении, совпадающем с результирующим импульсом. Так как ее масса во много раз больше массы молекул жидкости, то скорость частицы во много раз меньше, чем у молекул, поэтому броуновское движение можно легко проследить в микроскоп. Если отмечать положение броуновской частицы через равные промежутки времени, соединить их отрезками, то получившаяся ломаная линия будет похожа на показанную на *рисунке 1.2*, где  $\vec{s}_1, \vec{s}_2, \dots, \vec{s}_n$  – перемещения частицы за каждый промежуток времени, а  $\vec{s}$  – перемещение за все время наблюдения.

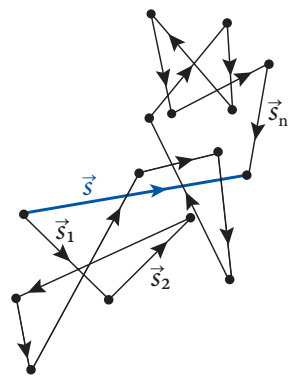


Рис. 1.2

Количественная теория броуновского движения была разработана в 1905 году немецким физиком Альбертом Эйнштейном (1879–1955), показавшим, что это беспорядочное движение подчиняется законам теории вероятности. Экспериментальные исследования, проведенные французским физиком Жаном Перреном (1870–1942) в 1906–1908 гг., и теоретические исследования в 1905–1906 гг. польского физика Мариана Смолуховского (1872–1917) полностью подтвердили правоту теории Эйнштейна. Более того, с помощью этой теории Перрен опытным путем определил число

Авогадро и массу молекулы. Существование атомов и молекул стало объективной реальностью. Из сказанного выше следует, что в основе молекулярно-кинетической теории вещества лежат следующие положения, подтвержденные опытом:

- Вещество состоит из частиц.
- Частицы вещества непрерывно и беспорядочно движутся.
- Частицы взаимодействуют друг с другом.

Количественные характеристики дискретной структуры вещества известны вам из гимназического курса химии. Повторим основные величины и их единицы измерения. В качестве единицы массы атомов и молекул взята 1/12 часть массы атома изотопа углерода  $^{12}\text{C}$ , названная **атомной единицей массы** – с символом а.е.м.:

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

Число, показывающее во сколько раз масса молекулы (атома)  $m_0$  больше 1/12 массы  $m_{\text{оc}}$  атома углерода  $^{12}\text{C}$ , называется **относительной молекулярной (атомной) массой  $M_r$** .

$$M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{\text{оc}}} = \frac{m_0}{1 \text{ а.е.м.}} \quad (1.1)$$

Как видно из (1.1),  $M_r$  – величина безразмерная. Относительная молекулярная масса сложных молекул равна сумме относительных атомных масс составляющих вещества.

Количество вещества, которое содержит столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода  $^{12}\text{C}$ , называется **молем** (обозначается **моль**).

Это число атомов или молекул одинаково для любого вещества и называется **числом (постоянной) Авогадро  $N_A$** . Масса одного моля вещества называется молярной массой и обозначается буквой  $M$ . Как следует из определения, данного выше, **молярная масса** углерода  $M_C = 0,012 \text{ кг/моль}$ , а число Авогадро:

$$N_A = \frac{M_C}{m_{\text{оc}}} = \frac{0,012 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{12 \text{ а.е.м.}} = \frac{10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{1 \text{ а.е.м.}} = \frac{10^{-3}}{1,66 \cdot 10^{-27}} \cdot \frac{1}{\text{моль}} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Молярная масса вещества с массой молекул  $m_0$  равна:

$$M = N_A \cdot m_0 = \frac{10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{1 \text{ а.е.м.}} \cdot M_r \cdot 1 \text{ а.е.м.} = 10^{-3} M_r \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \quad (1.2)$$

Количеством вещества  $\nu$  называется число молей вещества, содержащегося в данном теле.

Если обозначить массу вещества через  $m$ , то:

$$\nu = \frac{m}{M} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{N}{N_A}, \quad (1.3)$$

где  $N$  – число молекул в данном веществе. Единица количества вещества – **моль** – является одной из основных в **Международной системе единиц (СИ)**. Часто используют кратную единицу – **киломоль: 1 кмоль =  $10^3$  моль**.

Экспериментами установлено, что один моль любого газа при **нормальных условиях** ( $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $p = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ) занимает один и тот же объем. Он был назван **молярным объемом** и равен:

$$V_M = 22,42 \cdot 10^{-3} \frac{\text{М}}{\text{МОЛЬ}} = 22,42 \frac{\text{Л}}{\text{МОЛЬ}}. \quad (1.4)$$

Этот результат – частный случай проявления **закона Авогадро**.

### Пример решения задачи

Определите:

- число молекул в  $1 \text{ мм}^3$  воды;
- массу одной молекулы воды и ее диаметр, считая молекулу сферической.

### Решение

- а)** Число молекул найдем из отношения (1.3), где вместо массы  $m$  подставим произведение  $\rho V$  из определения плотности вещества. Итак, получим:

$$N = \frac{\rho V}{M} N_A.$$

Молярная масса воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ):  $M = (2 \cdot 1 + 16) \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ .

Плотность воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ):  $\rho = 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ .

Для числа молекул в объеме  $V = 1 \text{ мм}^3 = 10^{-9} \text{ м}^3$  воды получим:

$$N = \frac{10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \cdot 10^{-9} \text{ М}^3}{18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{МОЛЬ}} \approx 3,34 \cdot 10^{19} \text{ молекул.}$$

- б)** Из (1.2) для массы одной молекулы воды равна:

$$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ КГ/МОЛЬ}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ МОЛЬ}^{-1}} \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ КГ.}$$

Если молекулу считать сферической, то ее объем:

$$V_0 \approx \frac{\pi}{6} d^3,$$

откуда диаметр  $d$ :

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{6V_0}{\pi}}.$$

С другой стороны, объем молекулы  $V_0$  примерно равен отношению молярного объема к числу молекул в нем, а молярный объем выражается через плотность  $\left(\rho = \frac{M}{V_M}\right)$ .

Итак,

$$V_0 = \frac{V_M}{N_A} = \frac{M}{\rho N_A}$$

и диаметр молекулы

$$d \approx \sqrt[3]{\frac{6M}{\pi \rho N_A}}; d \approx 3,85 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 0,385 \text{ нм.}$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какие явления подтверждают движение молекул?
2. Как можно объяснить рост скорости диффузии при повышении температуры?
3. Почему не наблюдается хаотическое движение зернышек мака в воде? Что случится, если повысить температуру?
4. Каковы основные положения молекулярно-кинетической теории вы знаете?
5. Что такое атомная единица массы?
6. Дайте определение относительной молекулярной (атомной) массы.
7. Что представляет собой моль?
8. Как вычисляется относительная молекулярная масса сложной молекулы? А молярная масса?
9. Найдите относительную молекулярную массу и молярную массу пропана ( $C_3H_8$ ).
10. Вычислите массу одной молекулы метана ( $CH_4$ ).
11. Найдите число молекул в капле воды массой 2 г и в капле ртути той же массы. Сравните полученные результаты.
12. Сколько молекул газа содержит сосуд объемом в  $200 \text{ см}^3$ , если газ находится в нормальных условиях?
13. Сколько молекул содержится в 1 кг этана ( $C_2H_6$ ), взятого при нормальных условиях? Плотность этана в этих условиях равна  $1,36 \text{ кг/м}^3$ .
14. Определите массу куска золота, содержащего такое же количество атомов, как и кусок алюминия массой 1 кг.
15. За сутки испарилось полностью 50 г воды. Сколько молекул каждую секунду покидало поверхность воды?
16. На поверхность воды упала капля нефти массой 0,2 мг и образовала пленку площадью  $200 \text{ см}^2$ . Считая, что нефть растеклась слоем в две молекулы толщиной, найдите их диаметр. Плотность нефти равна  $830 \text{ кг/м}^3$ .

## 1.3 СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛ. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ И КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИИ МОЛЕКУЛ

Опыты по изучению строения вещества показали, что каждый атом состоит из частиц с положительным зарядом (ядра) и частиц с отрицательным зарядом (электронов). В обычных условиях атомы и молекулы электронейтральны, так как величина положительных зарядов равна величине отрицательных. Поскольку заряды одинакового знака отталкиваются, а противоположного притягиваются, то во время беспорядочного движения молекул между ними возникают как силы притяжения  $\vec{F}_{\text{пр.}}$ , так и силы отталкивания  $\vec{F}_{\text{от.}}$ . Равнодействующая этих сил  $\vec{F} = \vec{F}_{\text{пр.}} + \vec{F}_{\text{от.}}$  характеризует взаимодействие между молекулами и называется **межмолекулярной силой**.

Рассмотрим упрощенную систему из двух взаимодействующих молекул  $A$  и  $B$ . Предположим, молекула  $A$  неподвижна, а положение молекулы  $B$  может меняться и определяется радиусом-вектором  $\vec{r}$  (рис. 1.3, а). Как видно из рисунка, сила притяжения  $\vec{F}_{\text{пр.}}$  направлена противоположно радиусу-вектору  $\vec{r}$ , а  $\vec{F}_{\text{от.}}$  имеет то же направление, что и  $\vec{r}$ . Поэтому проекции этих сил на вектор  $\vec{r}$  всегда будут, соответственно,  $F_{\text{пр.}}$  – отрицательны и  $F_{\text{от.}}$  – положительны. Как показывают экспериментальные и теоретические исследования, силы отталкивания изменяются с расстоянием значительно быстрее сил притяжения. Поэтому межмолекулярная сила взаимодействия  $F = F_{\text{от.}} - F_{\text{пр.}}$  может принимать как положительные ( $F_{\text{от.}} > |F_{\text{пр.}}|$ ), так и отрицательные ( $F_{\text{от.}} < |F_{\text{пр.}}|$ ) значения (рис. 1.3, б). Расстояние  $r = r_0$ , для которого  $|F_{\text{пр.}}| = |F_{\text{от.}}|$  ( $F = 0$ ), соответствует устойчивому равновесию молекул и называется **равновесным расстоянием**. Для  $r < r_0$  преобладают силы отталкивания. Расстояние  $r = d$ , на котором очень сильно проявляются силы отталкивания, называется **эффективным диаметром** молекулы.

При увеличении расстояния  $r > r_0$  в системе преобладают силы притяжения, и для  $r = r'$  межмолекулярная сила  $|F|$  достигает максимального значения. Для  $r > r'$   $|F|$  быстро уменьшается до нуля.

Минимальное расстояние между молекулами  $r = r_m$  (рис. 1.3, б), на котором межмолекулярными силами можно пренебречь, называется **радиусом молекулярного действия** и составляет примерно 3–4 эффективных диаметра.

Другими словами, межмолекулярные силы проявляются на расстояниях порядка размеров молекул.

Рассмотрим взаимодействие молекул с энергетической точки зрения. Так как молекулы взаимодействуют, то они обладают не только кинетической, обусловленной их движением, но и потенциальной энергией.

Пусть молекула  $B$  приближается к молекуле  $A$  с большого расстояния  $r > r_m$ , где потенциальная энергия взаимодействия  $E_{\text{п}} = 0$ . Войдя в зону действия молекулы  $A$ , где преобладают силы притяжения, молекула  $B$  увеличивает свою скорость, растет ее кинетическая энергия.

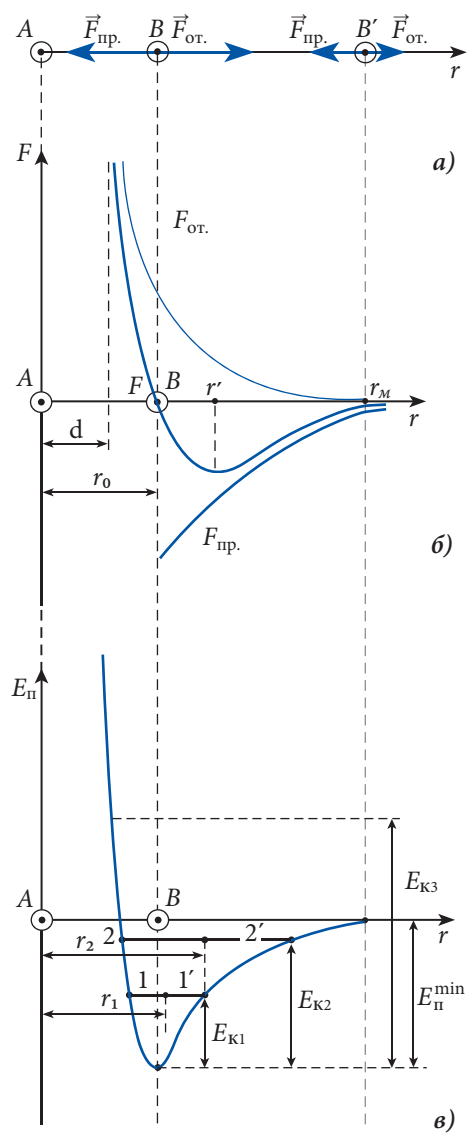


Рис. 1.3

Согласно закону сохранения энергии  $E_k + E_n = \text{const}$ , рост кинетической энергии в системе приводит к уменьшению потенциальной энергии. Когда расстояние между молекулами уменьшится до положения устойчивого равновесия  $r = r_0$ , потенциальная энергия станет минимальной (рис. 1.3, в). При дальнейшем уменьшении расстояния между молекулами  $r < r_0$  начинают преобладать силы отталкивания, уменьшающие скорость молекулы  $B$ , кинетическая энергия уменьшается, а потенциальная растет.

Часть графика потенциальной энергии вблизи ее минимального значения называется **потенциальной ямой**.

Представим себе, что молекулы системы не обладают кинетической энергией. В этом случае они находятся на расстоянии  $r_0$ , соответствующем устойчивому равновесию, а их потенциальная энергия будет равна  $E_n = E_n^{\text{min}}$ .

На самом деле у молекул всегда есть кинетическая энергия, и поэтому расстояние между ними то больше, то меньше  $r_0$ . Если кинетическая энергия меньше, чем минимальное значение  $E_{k1} < |E_n^{\text{min}}|$ , то движение молекулы  $B$  ограничено стенками потенциальной ямы в точках 1 и 1', где кинетическая энергия полностью превращается в потенциальную. В результате молекула  $B$  с энергией  $E_{k1}$  будет находиться на среднем расстоянии  $r_1$  от молекулы  $A$ . Из рисунка 1.3, в видно, что для молекулы  $B$  с кинетической энергией  $E_{k2}$ , где  $E_{k1} < E_{k2} < |E_n^{\text{min}}|$ , среднее расстояние  $r_2$  относительно молекулы  $A$  растет. Этот рост среднего расстояния между молекулами объясняет расширение твердых и жидких тел при нагревании (с ростом температуры растет кинетическая энергия молекул).

Если кинетическая энергия молекулы ( $E_{k3}$  на рис. 1.3, в) больше, чем  $|E_n^{\text{min}}|$ , то она покидает потенциальную яму, и расстояние между молекулами может расти неограниченно (как в случае газов).

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что представляют собой межмолекулярные силы? Как они зависят от расстояния между молекулами?
2. Объясните явление расширения твердых тел и жидкостей с помощью взаимодействия молекул.
3. Как объясняется на основе закона сохранения энергии существование минимума потенциальной энергии взаимодействия молекул?

## 1.4 МОДЕЛИ ТВЕРДОГО, ЖИДКОГО И ГАЗООБРАЗНОГО СОСТОЯНИЙ ВЕЩЕСТВА В МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ

Как известно, вещество может находиться в различных состояниях: твердом, жидком или газообразном, называемых **агрегатными состояниями**. Для более детального изучения вещества в различных агрегатных состояниях воспользуемся моделями этих состояний.



Мы знаем, что межмолекулярные силы стремятся удерживать молекулы на определенном расстоянии друг от друга, а их хаотическое движение способствует рассеиванию их в пространстве.

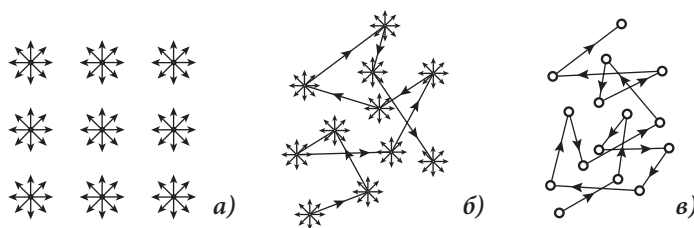


Рис. 1.4

Одновременное действие этих двух тенденций определяет агрегатное состояние вещества.

Вернемся к рисунку 1.3, в. Когда молекула  $B$  находится в потенциальной яме,  $E_{к1} \ll |E_n^{\min}|$ , она совершает колебательное движение вокруг положения равновесия, находящегося на расстоянии  $r_1$ . Силы взаимодействия настолько велики, что беспорядочное движение, определяемое кинетической энергией  $E_{к1}$ , не может их преодолеть. Поэтому **твердое состояние вещества** может быть представлено в виде упорядоченной структуры, называемой **кристаллической решеткой**. Молекулы совершают беспорядочные колебательные движения вокруг точек, именуемых узлами решетки. Вещество в таком состоянии характеризуется собственным объемом и формой. Схематически подобная модель показана на рисунке 1.4, а.

При нагревании вещества кинетическая энергия молекул растет, и когда она становится соизмеримой с минимальной потенциальной энергией  $E_{к2} \sim |E_n^{\min}|$ , вещество переходит в **жидкое состояние**. В этом случае одни молекулы совершают беспорядочное колебательное движение вокруг некоторых положений равновесия, а другие имеют возможность перейти в новые положения равновесия. Вещество приобретает текучесть и теряет свойство сохранять свою форму, принимая форму сосуда, в котором оно находится. Соответствующая модель жидкого состояния показана на рисунке 1.4, б.

При дальнейшем росте температуры кинетическая энергия молекул достигает значений, при которых они легко покидают потенциальную яму  $E_{к3} > |E_n^{\min}|$ . Межмолекулярные силы не могут удержать молекулы в зоне своего влияния, и они получают возможность перемещаться по всему пространству, то есть вещество переходит в газообразное состояние. Модель **газообразного состояния** (рис. 1.4, в) представляет собой движение молекул, потенциальная энергия которых практически равна нулю. Из-за столкновений траектория молекулы – ломаная линия, образованная из неравных отрезков, беспорядочно ориентированных в пространстве.

Так как силы притяжения практически отсутствуют, то газ может неограниченно расширяться, занимать весь предоставленный объем. Итак, у газа нет ни собственного объема, ни формы.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Как объясняется существование различных агрегатных состояний вещества?
2. Опишите модель твердого состояния вещества. Объясните, почему в этом состоянии движение молекул ограничено.

3. Почему при повышении температуры вещество переходит из твердого состояния в жидкое? Опишите модель жидкого состояния вещества.
4. В чем главное отличие газообразного состояния вещества от твердого и жидкого состояний? Какова в этом случае потенциальная энергия взаимодействия молекул?

1.5

## МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Законы идеального газа, полученные экспериментальным путем, имеют строгое доказательство в рамках молекулярно-кинетической теории. Согласно этой теории газ представляет собой огромное количество хаотически движущихся молекул. В процессе движения молекулы газа действуют с некоторой средней силой на стенки сосуда, в котором они находятся, оказывая, таким образом, давление.

В молекулярной физике, как и в механике, неизбежно использование моделей, упрощенно представляющих структуру вещества. Простейшей моделью газа является **модель идеального одноатомного газа**, которая описывается следующим образом:

- молекулы (атомы) представляют собой материальные точки, то есть их размеры пренебрежимо малы по сравнению с расстояниями между ними;
- межмолекулярные силы при движении отдельных молекул между соударениями отсутствуют, поэтому молекулы (атомы) движутся от соударения до соударения прямолинейно и равномерно;
- столкновения молекул (атомов) между собой и со стенками сосуда, в котором находится газ, абсолютно упруги.

Эта модель подходит и для реальных газов, если они находятся при низких давлениях и не очень низких температурах. В случае роста давления или/и уменьшения температуры межмолекулярными силами уже нельзя пренебрегать, молекулы нельзя считать материальными точками. Модель применять уже нельзя.

Несмотря на то, что модель идеального газа описывает реальную ситуацию очень приблизительно, она все же позволяет получить важные результаты, даже если они верны лишь в определенных пределах.

Предположим,  $N$  молекул идеального газа массой  $m_0$  каждая находится в сосуде в форме куба со стороной  $l$ . Проанализируем сначала действие, оказываемое одной молекулой на стенку сосуда (например, на левую). Другими словами, проследим движение молекулы со скоростью  $\vec{v}_1$  вдоль направления  $x$  (рис. 1.5). Молекула действует на стенку с силой  $F_{1x}$ , равной по модулю и противоположной по направлению силе  $F'_{1x}$ , с которой стенка действует на молекулу. Величина силы  $F'_{1x}$  согласно основному закону динамики равна скорости изменения импульса молекулы:

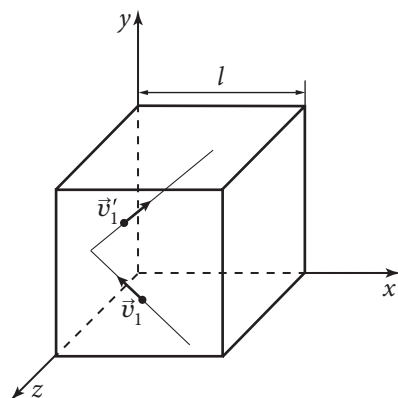


Рис. 1.5

$$F'_{1x} = \frac{\Delta(m_0 v)_{1x}}{\Delta t},$$

где  $\Delta t$  - продолжительность соударения. Так как соударение, согласно модели идеального газа, абсолютно упруго, изменяется только составляющая  $x$  импульса от  $m_0 v_{1x}$  до  $m_0 v'_{1x}$ , где  $v'_{1x} = -v_{1x} = |v_{1x}|$ . Итак, в результате соударения импульс молекулы изменяется на величину

$$\Delta(m_0 v)_{1x} = m_0 v'_{1x} - m_0 v_{1x} = -2m_0 v_{1x} = 2m_0 |v_{1x}|$$

и сила, действующая на молекулу со стороны стенки  $F'_{1x} = -\frac{2m_0 v_{1x}}{\Delta t}$ . Молекула же действует на стенку с силой  $F_{1x} = -F'_{1x}$  ( $|F_{1x}| = |F'_{1x}|$ ) только в момент соударения. В течение времени  $\tau$  молекула соударяется со стенкой  $N_1$  раз. Средняя сила  $\bar{F}_{1x}$ , действующая со стороны молекулы за время  $\tau$  будет значительно меньше силы  $|F_{1x}|$ , действующей со стороны молекулы за время  $\Delta t$ , так как  $\tau \gg \Delta t$ :

$$\bar{F}_{1x} = 2m_0 |v_{1x}| \cdot \frac{N_1}{\tau}.$$

Число столкновений  $N_1$  равно отношению между всем пройденным молекулой расстоянием  $L$  за время  $\tau$  и расстоянием, пройденным между двумя последовательными соударениями с одной и той же стенкой. Так как  $L = |v_{1x}| \tau$ , а расстояние, пройденное между двумя последовательными соударениями с одной и той же стенкой равно  $2l$ , то

$$N_1 = \frac{|v_{1x}| \tau}{2l}$$

и для средней силы, действующей на стенку со стороны молекулы получим:

$$\bar{F}_{1x} = 2m_0 v_{1x} \cdot \frac{|v_{1x}| \tau}{2l \tau} = \frac{m_0 v_{1x}^2}{l}.$$

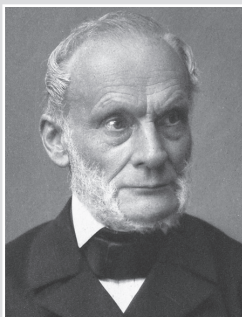
Во время движения в сосуде молекула сталкивается и с другими стенками, перпендикулярными направлению  $x$ . Но эти соударения не изменяют проекцию импульса на направление  $x$ . Кроме этого, молекула может сталкиваться и с другими молекулами, что может привести к изменению скорости  $v_{1x}$ . Но каждое уменьшение (или увеличение) импульса молекулы передается другой молекуле, затем, в свою очередь, третьей и т.д. Если учесть средние силы, с которыми действуют и другие молекулы, этот эффект не изменяет значение результирующей средней силы. С этими уточнениями результирующая средняя сила, действующая со стороны всех  $N$  молекул вдоль направления  $x$ , равна:

$$\bar{F}_x = \bar{F}_{1x} + \bar{F}_{2x} + \dots + \bar{F}_{Nx} = \frac{m_0}{l} (v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2). \quad (1.5)$$

Сумма в скобках в (1.5) выражается через среднюю величину квадрата составляющей  $x$  скорости  $\bar{v}_x^2$ . Действительно,

$$v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2 = N \cdot \frac{v_{1x}^2 + v_{2x}^2 + \dots + v_{Nx}^2}{N} = N \bar{v}_x^2$$

и из выражения (1.5) следует:



Один из основателей термодинамики и кинетической теории газов. Сформулировал II закон термодинамики и ввел понятие энтропии. Показал, что изменение энтропии всегда положительно и определяет направление протекания процессов. Разработал теорию паровых машин, указал пути увеличения их коэффициента полезного действия. В кинетическую теорию газов ввел статистический метод исследования, сформулировал понятия сферы действия молекул, длины свободного пробега и др. Первый вычислил величину давления газа на стенки сосуда, в котором он находится. Развил теорию термоэлектричества и ввел понятие электролитической диссоциации. Разработал теорию поляризации диэлектриков.

$$\bar{F}_x = \frac{m_0}{l} \cdot N \bar{v}_x^2. \quad (1.6)$$

Так как движение молекул хаотично, то все направления равноправны, средние величины квадратов проекций скоростей на направления  $x$ ,  $y$  и  $z$  равны, поэтому  $\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2$ . Так как  $\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2$ , получим  $\bar{v}^2 = 3\bar{v}_x^2$  и  $\bar{v}_x^2 = \frac{\bar{v}^2}{3}$ . Итак, средняя сила, действующая на каждую из стенок сосуда, одна и та же и равна:

$$\bar{F} = \frac{m_0}{l} N \frac{\bar{v}^2}{3}. \quad (1.7)$$

Согласно определению, давление  $p = F/S$ . Используя (1.7) и учитывая, что  $S = l^2$ , получим:

$$p = \frac{1}{3} \cdot \frac{Nm_0\bar{v}^2}{l^3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{Nm_0\bar{v}^2}{V} = \frac{1}{3} nm_0\bar{v}^2, \quad (1.8)$$

где  $l^3 = V$  – объем сосуда, а  $n = \frac{N}{V}$  – число молекул в единице объема, или их концентрация. Величина  $v_T = \sqrt{\bar{v}^2}$  называется **средней квадратичной скоростью** или **тепловой скоростью** и может быть найдена опытным путем.

Заметим, что  $\frac{m_0\bar{v}^2}{2} = \bar{\epsilon}_{\text{пост.}}$  представляет собой **среднюю кинетическую энергию** поступательного движения молекулы. Уравнение (1.8) можно записать в виде:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon}_{\text{пост.}}. \quad (1.9)$$

Это уравнение было впервые получено Р. Клаузиусом и называется **основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа**.

Оно показывает, что:

**Давление газа прямо пропорционально кинетической энергии поступательного движения всех молекул, содержащихся в единице объема.**

Таким образом, давление газа, как макроскопический параметр, является результатом действия всех молекул газа некоторой средней силой на единицу площади стенок сосуда, в котором он находится.

## Пример решения задачи

1

## Дано:

$$V = 1 \text{ л,}$$

$$m = 100 \text{ г,}$$

$$M = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}},$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Па}$$

## СИ:

$$10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$10^{-1} \text{ кг}$$

В баллоне объемом  $V = 1$  л находятся 100 г гелия при нормальном атмосферном давлении. Определите:

- а) среднюю кинетическую энергию одной молекулы гелия в этих условиях;  
 б) среднюю кинетическую энергию всех молекул в баллоне.

а)  $\bar{\epsilon}_{\text{пост.}}$  - ?; б)  $\bar{E}_{\text{пост.}}$  - ? Дж

## Решение

- а) Согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории идеального газа (1.9) средняя кинетическая энергия одной молекулы равна

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{3p_0}{2n} = \frac{3p_0V}{2N}.$$

Из определения количества вещества (1.3) для числа молекул в баллоне имеем

$$N = \frac{m}{M} N_A, \text{ а для средней кинетической энергии одной молекулы получаем:}$$

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{3Mp_0V}{2mN_A}; \bar{\epsilon}_{\text{пост.}} \approx 1 \cdot 10^{-23} \text{ Дж.}$$

- б) Средняя кинетическая энергия всех молекул в баллоне равна произведению энергии одной молекулы на все число молекул:

$$\bar{E}_{\text{пост.}} = N \cdot \bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{3}{2} p_0 V; \bar{E}_{\text{пост.}} \approx 150 \text{ Дж.}$$

## Пример решения задачи

2

## Дано:

$$p = 700 \text{ кПа,}$$

$$n = 3,01 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3},$$

$$M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

## СИ:

$$7 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Поток молекул азота направлен перпендикулярно стене. Чему равна скорость этих молекул, если они оказывают давление на стену 700 кПа, а их концентрация равна  $3,01 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ? Поток молекул считать идеальным газом.

$$v - ?$$

$$\text{м/с}$$

## Решение

Давление, оказываемое молекулами при соударении с поверхностью  $S$  стены, равно

$$p = \frac{F}{S} = \frac{N \cdot F_1}{S},$$

где  $F_1$  – сила, действующая со стороны одной молекулы при достижении изучаемой поверхности, а  $N$  – число этих молекул.

Движение молекул идеального газа происходит в соответствии с законами классической механики. Согласно второму закону Ньютона импульс силы  $F_1$  одной молекулы равен изменению её импульса:

$$F_1 \Delta t = \Delta(m_0 v) = 2m_0 v,$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы, которая, как видно из (1.2), выражается через молярную массу  $M$  и число Авогадро  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>,  $m_0 = M / N_A$ .

За промежутки времени  $\Delta t$  изучаемой поверхности достигают молекулы, которые находились от нее на расстоянии, меньшем или равном  $v\Delta t$ . Таким образом, число молекул  $N$  равно

$$N = nSv \cdot \Delta t.$$

Давление, оказываемое потоком молекул, равно

$$p = \frac{nSv\Delta t \cdot 2m_0v}{S\Delta t} = 2nm_0v^2 = \frac{2nMv^2}{N_A},$$

откуда для скорости получаем:

$$v = \sqrt{\frac{pN_A}{2nM}} = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^5 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{2 \cdot 3,01 \cdot 10^{25} \cdot 28 \cdot 10^{-3}}} = 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Опишите модель идеального газа. При каких условиях эта модель применима?
2. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.
3. Дайте определение средней квадратичной скорости молекул.
4. Чему равна тепловая скорость молекул газа массой 3 кг, если он занимает объем 5 м<sup>3</sup> под давлением 5 · 10<sup>5</sup> Па?
5. Найдите число молекул кислорода в 1 см<sup>3</sup>, если давление равно 10<sup>3</sup> Па, а средняя квадратичная скорость молекул – 500 м/с.
6. В сосуде объемом 2 л находится идеальный газ при нормальном атмосферном давлении. Чему равна средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул этого газа?
7. Чему равно давление водорода в сосуде, если концентрация молекул 10<sup>26</sup> м<sup>-3</sup>, а средняя квадратичная (тепловая) скорость  $v_T = 600$  м/с?
- 8.\* На пути потока молекул водорода находится диск площадью 6,02 см<sup>2</sup>. Определите силу, действующую на диск, если скорость молекул равна 1 000 м/с, а их концентрация – 10<sup>20</sup> м<sup>-3</sup>.

1.6

## ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Экспериментально установлено, что степень нагретости газа определяется тепловым хаотическим движением его молекул. В результате их соударений между собой устанавливается равновесное состояние, в котором число молекул со скоростями, заключенными в определенном интервале, постоянно. Это состояние характеризуется другим, очень важным, макроскопическим параметром, называемым **температурой**.

С точки зрения молекулярно-кинетической теории температура газа является свойством системы молекул и поэтому должна зависеть от определенных микроскопических величин. В самом деле, допустим, два газа имеют разную степень нагретости, т.е. различную температуру. Это означает, что средние кинетические энергии молекул каждого газа также различны, например  $\bar{\epsilon}_{\text{пост.1}} > \bar{\epsilon}_{\text{пост.2}}$ . Если привести в контакт эти два газа, то их молекулы будут соударяться между собой. В результате этих соударений молекулы первого газа, имея бóльшую скорость, будут ускорять молекулы второго

газа, передавая им часть своей кинетической энергии. Передача энергии от молекул первого газа молекулам второго будет продолжаться до тех пор, пока средние кинетические энергии молекул обоих газов не станут равными. В этот момент газы находятся в равновесии и имеют одинаковую степень нагретости, т.е. одинаковую температуру и среднюю кинетическую энергию молекул  $\bar{\epsilon}_{\text{пост.1}} = \bar{\epsilon}_{\text{пост.2}}$ .

Из вышеприведенного анализа следует, что температура и средняя кинетическая энергия молекул газа ведут себя одинаково и между этими двумя величинами должна существовать прямая зависимость.

**Температура идеального газа является мерой беспорядочного движения его молекул.**

Следовательно, температура не может уменьшаться сколь угодно, а только до тех пор, пока не «прекратится» тепловое хаотическое движение молекул. Это самая низкая возможная температура, она называется **абсолютным нулем**.

В 1848 году английский физик Уильям Томсон, лорд Кельвин (1824–1907) ввел в физику **термодинамическую шкалу** температур, названную его именем (**шкала Кельвина**). Температура, измеряемая от абсолютного нуля, называется **термодинамической температурой** или **абсолютной температурой**. Она обозначается  $T$  и выражается в кельвинах. Кельвин обозначается символом  $K$  и является одной из фундаментальных единиц СИ. Температура, измеряемая по шкале Кельвина, имеет только положительные значения.

Для измерения температуры используются и другие шкалы. Самые известные из них – шкалы Цельсия и Фаренгейта.

Шкала Цельсия построена на основе двух реперных точек. Температура, измеренная по этой шкале, обозначается символом  $^{\circ}C$ . Первая реперная точка, условно принятая за  $0^{\circ}C$ , – это температура равновесного состояния чистой воды и тающего льда при нормальном атмосферном давлении  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па. Вторая реперная точка является температурой кипения чистой воды при этом же давлении; она, тоже условно, принята за  $100^{\circ}C$ . Полученный интервал разделен на 100 равных частей, поэтому шкала Цельсия является **стоградусной** шкалой.

Как будет показано в п. 1.8, г, температуре абсолютного нуля по шкале Кельвина соответствует значение  $-273,15^{\circ}C$ . Шкала Кельвина также стоградусная, связь между температурными шкалами Цельсия и Кельвина определяется выражением

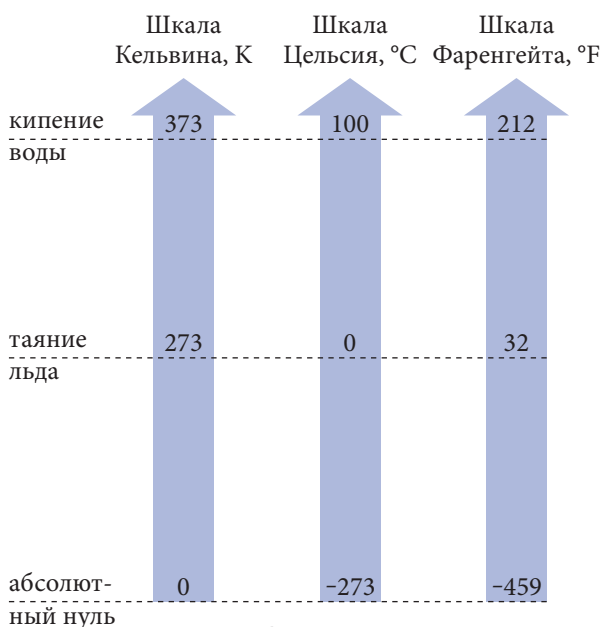


Рис. 1.6

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - 273, T = t (^{\circ}\text{C}) + 273. \quad (1.10)$$

Другая температурная шкала, используемая только в США и в ненаучных целях, – это шкала Фаренгейта. Градус Фаренгейта обозначается символом  $^{\circ}\text{F}$ . По этой шкале температура равновесного состояния чистой воды и тающего льда взята равной  $32^{\circ}\text{F}$ , а кипения чистой воды –  $212^{\circ}\text{F}$ . Соответствующий интервал разделен на 180 равных частей. Таким образом, градус по шкале Фаренгейта меньше градуса по шкале Цельсия в  $180/100 = 9/5$  раз. Поскольку температуре  $0^{\circ}\text{C}$  по шкале Цельсия соответствует температура  $32^{\circ}\text{F}$ , то связь между этими шкалами определяется выражением:

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{5}{9} (T_{\text{F}} - 32), T_{\text{F}} = \frac{9}{5} t(^{\circ}\text{C}) + 32. \quad (1.11)$$

На рисунке 1.6 схематически представлены рассмотренные температурные шкалы и реперные точки, используемые для их установления.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Дайте молекулярно-кинетическое толкование температуры. Применимо ли понятие температуры к одной молекуле?
2. Почему термодинамическая температура не может быть отрицательной?
3. Что представляет собой термодинамическая шкала температур?
4. Как построены температурные шкалы Цельсия и Фаренгейта?
5. Назовите единицы температуры по шкалам Кельвина, Цельсия и Фаренгейта. Какая из них используется в СИ?
6. При какой температуре показания по шкалам Цельсия и Фаренгейта совпадают? А по шкалам Кельвина и Фаренгейта?
7. В жаркий летний день температура воздуха равна  $95^{\circ}\text{F}$ . Чему равна температура в этот день по шкале Цельсия?

## 1.7

### УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Из молекулярно-кинетического толкования температуры ясно, что средняя кинетическая энергия молекул газа и его абсолютная температура ведут себя одинаково и, следовательно, должны выражаться одна через другую. Австрийский физик Людвиг Больцман (1844–1906) первым показал, что

средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул идеального газа прямо пропорциональна абсолютной температуре и зависит только от нее:

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (1.12)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – это универсальная постоянная, называемая **постоянной Больцмана**.

Особо отметим, что хотя уравнение (1.12) было получено для идеального газа, оно применимо и для реальных газов, а также для жидкостей и твердых тел.

Поскольку давление газа зависит от средней кинетической энергии поступательного движения молекул, то оно должно зависеть и от температуры. В



самом деле, подставив (1.12) в (1.9), получим связь между давлением и температурой:

$$p = nkT. \tag{1.13}$$

Это выражение позволяет определять концентрацию любого идеального газа, если известны его макроскопические параметры – давление и температура. А так как выражение (1.13) не зависит от природы газа, то для всех идеальных газов, находящихся в нормальных условиях (нормальном атмосферном давлении  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па и температуре  $t = 0$  °С или  $T = 273$  К), концентрация молекул одинакова. Численное значение этой концентрации называется **числом Лошмидта**.

Формула, выражающая функциональную зависимость только макроскопических параметров (в случае идеального газа – это давление, объем и температура), называется **уравнением состояния идеального газа**. Принимая во внимание, что число молекул в единице объема (концентрация)  $n = \frac{N}{V}$ , из (1.13) получим:

$$pV = NkT. \tag{1.14}$$

Число молекул в изучаемой массе газа может быть определено из формулы для количества вещества (1.3):

$$N = \frac{m}{M} N_A = \nu N_A. \tag{1.15}$$

Подставив (1.15) в (1.14), получим:

$$pV = \nu N_A kT = \frac{m}{M} N_A kT.$$

Произведение  $R = N_A \cdot k = 6,023 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – это **универсальная газовая постоянная**. Далее, в п. 1,8, д, будет показано, что эта постоянная может быть определена и экспериментально.

Таким образом, уравнение состояния идеального газа принимает вид

$$pV = \nu RT = \frac{m}{M} RT. \tag{1.16}$$

Оно выражает связь между макроскопическими параметрами данной массы газа.

Из соотношения (1.12) следует, что одновременно с ростом температуры увеличивается интенсивность теплового хаотического движения молекул газа. Количественно это движение может быть описано с помощью средней квадратичной (тепловой) скорости. Используя ее определение и (1.12), получим:

$$v_T = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

Так как  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ , а  $kN_A = R$ , то:

$$v_T = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \tag{1.17}$$

Для данного идеального газа тепловая скорость пропорциональна квадратному корню из абсолютной температуры и зависит только от нее. При тепловом равновесии

смеси газов становится одинаковой их температура, а значит и средние кинетические энергии поступательного движения молекул, причем скорости молекул различны: у молекул большей массы скорости меньше и наоборот. Например, для температуры 300 К из (1.17) получим тепловую скорость молекул кислорода примерно равной 483 м/с, а гелия – 1368 м/с.

### Пример решения задачи

1

#### Дано:

$$p = 10^5 \text{ Па},$$

$$v_T = 2000 \text{ м/с}$$

$n - ?$

Найти концентрацию молекул гелия в сосуде, если газ находится под давлением  $p = 10^5$  Па, а тепловая скорость молекул равна  $v_T = 2000$  м/с.

#### Решение

Из уравнения (1.8) для концентрации молекул запишем:  $n = \frac{3p}{m_0 v_T^2}$ .

Так как  $m_0 = M/N_A$  ( $M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>), получим:

$$n = \frac{3pN_A}{M_0 v_T^2}; \quad n = 1,13 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

### Пример решения задачи

2

#### Дано:

$$t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\frac{\Delta m}{m_1} = 0,4,$$

$$\Delta t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{p_1}{p_2} - ?$$

Си:  
300 К,  
50 К

В сосуде находится идеальный газ при температуре 27 °С. После того, как из сосуда было откачано 40 % его массы, температура понизилась на 50 °С. Во сколько раз уменьшилось давление газа?

#### Решение

В соответствии с уравнением состояния идеального газа (1.16) для двух состояний газа (до и после откачивания) запишем:

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

Поделив первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{T_1}{T_2}.$$

Поскольку температура газа уменьшилась на  $\Delta t = \Delta T$ , то  $T_2 = T_1 - \Delta T$ . Из условий задачи известно относительное уменьшение массы, т. е.

$$\frac{\Delta m}{m_1} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} = 1 - \frac{m_2}{m_1},$$

откуда

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{1 - \frac{\Delta m}{m_1}}$$

Таким образом, для отношения давлений до и после откачивания газа имеем:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{\left(1 - \frac{\Delta m}{m_1}\right)(T_1 - \Delta T)} = \frac{300}{(1 - 0,4)(300 - 50)} = 2.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какая связь существует между средней кинетической энергией поступательного движения молекул и температурой?
2. Что представляет собой уравнение состояния идеального газа? Напишите его.
3. Как зависит тепловая скорость молекул от природы газа?
4. Вычислите концентрацию газа в нормальных условиях (число Лошмидта).
5. Определите температуру газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул равна  $4,14 \cdot 10^{-20}$  Дж.
6. Средняя квадратичная скорость молекул газа при  $0^\circ\text{C}$  равна 493 м/с. Чему равна молярная масса этого газа?
7. Определите плотность газа, взятого под давлением  $5 \cdot 10^5$  Па, если тепловая скорость молекул равна 600 м/с.

1.8

## ПРОСТЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Изучение связи между изменяющимися параметрами состояния в тепловых процессах вначале было проведено экспериментально. Если один из параметров состояния  $p$ ,  $V$ ,  $t$  не меняется, то процесс называется **простым**: **изотермическим** ( $t = \text{const}$ ); **изобарным** ( $p = \text{const}$ ) и **изохорным** ( $V = \text{const}$ ).

### а. Изотермический процесс

Поведение газа при постоянной температуре можно исследовать с помощью устройства, схематически представленного на рисунке 1.7. Оно состоит из гофрированного цилиндра (сильфона) 1, крышка которого соединена с винтом 2. Сбоку установлена шкала 3, с помощью которой измеряется объем в условных единицах. Давление газа в цилиндре измеряется манометром 4, соединенным с цилиндром резиновой

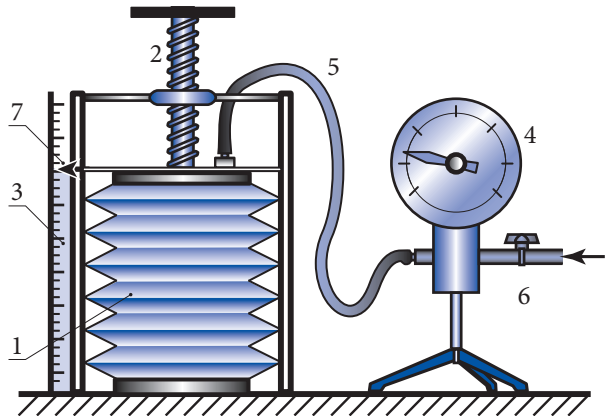
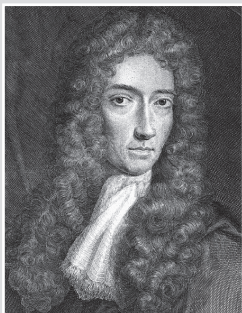


Рис. 1.7



Работал в разных областях физики: молекулярной физики, оптики, электричества, гидростатики, акустики и др. Сконструировал первый барометр. Исследовал упругость твердых тел, выдвинул гипотезу о сложной структуре белого света, исследовал возможность электризации через влияние. В 1663 году открыл цветные кольца в тонких пленках, позже названные „кольцами Ньютона“. Усовершенствовал воздушный насос Герике и с его помощью исследовал упругие свойства воздуха. Определил удельный вес и степень разреженности воздуха. Показал, что подъем жидкости в тонких трубках (капиллярах) не связан с атмосферным давлением.

трубкой 5. Изучаемый газ попадает в устройство через кран 6. При открытом кране в сильфоне находится определенная масса газа (воздуха), занимающая объем  $V_1 = V_{\max}$  при нормальном атмосферном давлении  $p_1 = p_0 = 10^5$  Па. После закрытия крана масса изучаемого газа остается постоянной.

Сохраняя температуру газа постоянной ( $t = \text{const}$ ), видим, что при вращении винта одновременно со сжатием газа его давление растет, а при расширении газа давление уменьшается. Во время сжатия (расширения) газа, отмечая объемы для трех различных положений указателя 7 сильфона и соответствующие давления, измеренные манометром, можем убедиться, что произведение давления на объем практически не меняется:

$$p_1 V_1 \approx p_2 V_2 \approx p_3 V_3.$$

Этот результат впервые был получен в 1662 году английским физиком и химиком Робертом Бойлем и независимо от него в 1676 году французским ученым Эдмом Мариоттом (1620–1684).

В изотермическом процессе ( $t = \text{const}$ ) для данной массы газа ( $m = \text{const}$ ) произведение давления на объем – величина постоянная:

$$pV = \text{const}, \text{ для } t = \text{const}, m = \text{const}. \quad (1.18)$$

Зависимость между давлением и объемом определенной массы газа при постоянной температуре на графике с координатами  $p$ ,  $V$  имеет вид равнобочной гиперболы, называемой **изотермой**. На рисунке 1.8 показано „семейство“ изотерм определенной массы газа, подчиняющихся изотермическим превращениям при температурах:  $t_1 < t_2 < t_3$ . Чем выше температура, тем дальше от осей координат находится изотерма.

Закон Бойля–Мариотта подтверждается экспериментально только при относительно низких давлениях. Опыт показал, что при больших давлениях газ сжимается сначала сильнее, чем следует из закона, а при дальнейшем росте давления – слабее. Это объясняется тем, что с ростом давления уменьшается объем, занимаемый газом, а не объем самих молекул. То есть при бесконечном росте давления

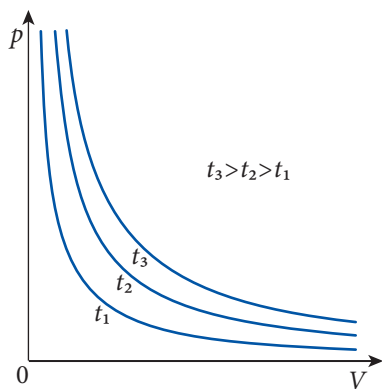


Рис. 1.8

объем газа не может стремиться к нулю, как следует из (1.18). Газ, подчиняющийся закону Бойля–Мариотта при любых объемах и давлениях, должен обладать свойствами, присущими модели **идеального газа**. Такой газ не существует в природе, но реальные газы в обычных условиях ведут себя как идеальный газ, если давление не превышает  $\sim 10^7$  Па = 100  $p_0$  и температура значительно больше температуры сжижения газа.

## Лабораторная работа

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЗАКОНА БОЙЛЯ–МАРИОТТА

<b>Цель работы:</b>	Опытное определение давления данной массы газа и проверка закона Бойля–Мариотта.
<b>Приборы и материалы:</b>	стеклянная трубка, закрытая с одного конца, длиной 60–70 см и диаметром 8–10 мм; прозрачный сосуд цилиндрической формы высотой 40–60 см; барометр (общий для всего класса), миллиметровая линейка (рулетка).

#### Краткая теория:

В этой работе изучается поведение определенной массы воздуха, считающегося идеальным газом, заключенной внутри стеклянной трубки длиной  $l$  и площадью сечения  $S$ . Если трубку опустить отверстием вниз в сосуд с водой, то длина воздушного столба в ней уменьшится на величину  $h$  высоты столба воды, вошедшей в трубку (рис. 1.9). Из (1.18) и изложено выше получим

$$p_0 S l = p(l - h) S \text{ или } p_0 l = p(l - h),$$

где  $p_0$  – атмосферное давление, а  $p$  – давление воздуха в трубке.

Давление  $p$  вычисляется, если известна измеренная линейкой  $H - h$  разность между уровнями воды в сосуде и соответственно в трубке (рис. 1.9). В самом деле, давление в точке  $A$  внутри тонкой трубки  $p_A = p + \rho g h$ , а на том же уровне в точке  $B$  в сосуде имеем:  $p_B = p_0 + \rho g H$ . Приравняв давления  $p_A = p_B$ , выразим давление закрытого в трубке воздуха:

$$p = p_0 + \rho g (H - h), \tag{1.19}$$

где  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения.

#### Ход работы:

1. Измерьте атмосферное давление  $p_0$  с помощью барометра.
2. Измерьте длину стеклянной трубки  $l$ .
3. Определите произведение  $p_0 l$  давления на длину столба воздуха в начальном состоянии.
4. Опустите стеклянную трубку в сосуд с водой открытым концом вниз.
5. Измерьте высоту столба воды  $h$ , вошедшего в стеклянную трубку, и вычислите длину закрытого в трубке столба воздуха  $l - h$  в конечном состоянии.
6. Измерьте разность уровней воды в сосуде и в трубке  $H - h$  и с помощью формулы (1.19) найдите давление воздуха в трубке в конечном состоянии.

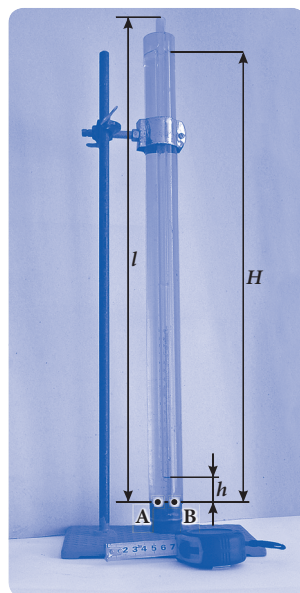


Рис. 1.9

- Определите произведение  $p(l-h)$  давления на длину столба воздуха в конечном состоянии.
- Сравните величины произведений  $p_0 l$  и  $p(l-h)$  и убедитесь в их приблизительном равенстве, проверив таким образом закон Бойля–Мариотта.
- Повторите 2–3 раза измерения и вычисления из заданий 4–8, запишите полученные результаты в таблицу.

№ опыта	$p_0$ (кПа)	$l$ (м)	$h$ (м)	$l-h$ (м)	$H-h$ (м)	$p$ (кПа)	$p_0 l$	$p(l-h)$
1.								
2.								
3.								

- Сделайте вывод относительно полученных результатов.

## ВОПРОСЫ

- Ученик провел опыт по проверке закона Бойля–Мариотта, опустив стеклянную трубку в горячую воду. Получит ли ученик результаты, подтверждающие этот закон? Объясните, почему.
- Объясните, как вычисляется давление воздуха внутри стеклянной трубки.

## 6. Изобарный процесс

Рассмотрим процесс расширения некоторой массы газа ( $m = \text{const}$ ) при постоянном давлении. Для этого возьмем стеклянную колбу  $B$  с изучаемым газом (например, воздухом), закроем ее пробкой, через которую пропущена стеклянная трубка  $S$ , изогнутая под прямым углом (рис. 1.10). В горизонтальном участке трубки находится капля подкрашенной жидкости, отделяющая газ от внешней среды. Сначала колбу поместим в сосуд, содержащий смесь воды со льдом ( $t = 0^\circ\text{C}$ ). Объем при этой температуре обозначим через  $V_0$ . Шкала на горизонтальной части трубки  $S$  позволяет определить занимаемый газом в колбе объем при температуре  $t$ , измеряемой термометром  $T$ . Нагревая воду в сосуде с помощью спирали, по которой проходит электрический ток, замечаем перемещение капли подкрашенной жидкости. Для равномерного нагрева содержащаяся в сосуде вода перемешивается мешалкой  $A$ . Итак, для различных температур каждый раз определяем абсолютное изменение объема газа  $\Delta V = V - V_0$  или относительное изменение  $\Delta V/V_0$ , показывающее, какую часть от объема  $V_0$  составляет его абсолютное изменение  $\Delta V$ . Так как капля жидкости в горизонтальной трубке во время нагрева

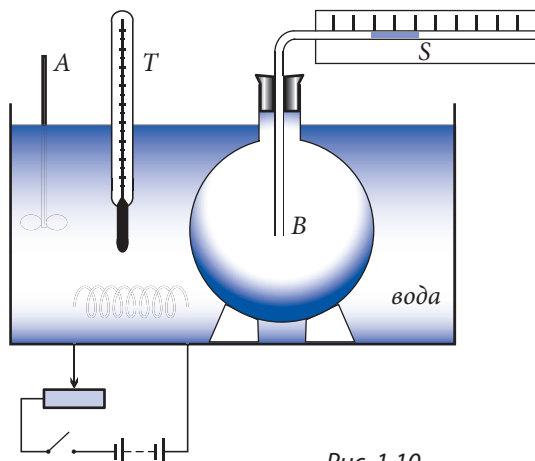


Рис. 1.10



Исследовал тепловые явления и проблемы молекулярной физики. Во время полета на воздушном шаре измерял температуру и влажность воздуха, установив, что температура воздуха уменьшается при расширении и увеличивается при сжатии. Изучал явление расширения газов и их свойства в изолированных системах. Разработал способ определения плотности паров и исследовал их упругость. Продемонстрировал равенство температурных коэффициентов объемного расширения у всех газов.

находится в равновесии, то давление изучаемого газа остается все время постоянным и равным атмосферному.

Экспериментируя с разными массами газа, Гей-Люссак в 1802 году открыл закон:

Относительное изменение объема данной массы газа ( $m = \text{const}$ ) при постоянном давлении прямо пропорционально изменению температуры и не зависит от природы газа.

$$\frac{V - V_0}{V_0} = \alpha t, \text{ для } m = \text{const}, p = \text{const}. \quad (1.20)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  называется **температурным коэффициентом объемного расширения**. Учитывая, что изменение температуры происходит начиная с  $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t = t - t_0 = t$ . Как следует из (1.20), этот коэффициент численно равен относительному изменению объема газа при нагревании его на один градус. Точные измерения  $\alpha$  для всех газов дали одинаковые значения:

$$\alpha = 0,00366 \text{ град}^{-1} = \frac{1}{273,15} \text{ град}^{-1}.$$

Из (1.20) для объема газа, находящегося при температуре  $t$ , можем записать:

$$V = V_0 (1 + \alpha t). \quad (1.21)$$

Объем газа, находящегося при постоянном давлении, растет линейно с температурой.

Изобарный процесс можно представить графически. В координатах  $V, t$  уравнение (1.21) имеет вид прямой, называемой **изобарой**, пересекающей ось объемов в точке с координатами  $(V_0, 0)$ . На рисунке 1.11 представлены изобары, полученные для одной и той же массы газа и разных давлений. Как видно из рисунка, они имеют разные наклоны, их продолжения пересекают ось температур в одной и той же точке с координатами  $(0, -1/\alpha)$ .

Отметим, что закон Гей-Люссака не выполняется при низких температурах

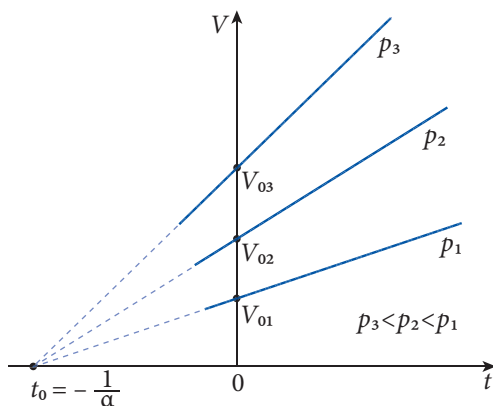


Рис. 1.11

(штриховая часть изобар на *рис. 1.11*), когда вещество находится в жидком или твердом состоянии.

## в. Изохорный процесс

Изменение давления газа при постоянном объеме можно рассмотреть с помощью прибора, описанного выше (*рис. 1.7*). С этой целью опустим сильфон с каким-нибудь определенным объемом газа в сосуд со льдом и водой при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Давление газа  $p_0$  при этой температуре показывает манометр. Не меняя объем газа, изменим его температуру, нагревая сосуд с водой и льдом. Отметив показания манометра для различных температур, мы увидим, что изменение давления газа прямо пропорционально изменению температуры.

Экспериментируя с различными газами, французский физик Ж.А. Шарль (1746–1823) открыл в 1787 году закон, названный его именем.

При изохорном нагреве данной массы газа ( $m = \text{const}$ ) относительное изменение его давления прямо пропорционально изменению температуры и не зависит от природы газа:

$$\frac{p - p_0}{p_0} = \beta t, \quad \text{для } m = \text{const}, V = \text{const}. \quad (1.22)$$

Коэффициент пропорциональности  $\beta$  называется **температурным коэффициентом давления**, он численно равен относительному изменению давления газа при нагреве его на один градус. В формуле (1.22) учтено, что изменение температуры  $\Delta t = t - t_0 = t$  ( $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ). Точные измерения показали, что для всех газов при температурах намного выше температуры сжижения газов и низких давлениях коэффициент  $\beta$  совпадает по величине с коэффициентом  $\alpha$ :

$$\beta = \alpha = 0,00366 \text{ град}^{-1} = \frac{1}{273,15} \text{ град}^{-1}.$$

Из (1.22) следует:

$$p = p_0 (1 + \beta t). \quad (1.23)$$

Давление газа при постоянном объеме растет линейно с температурой.

На *рисунке 1.12* показан график зависимости давления от температуры в координатах  $p$  и  $t$ . Для данной массы газа получены прямые, называемые **изохорами** (греч. *chora* – пространство), которые имеют разные наклоны, но их продолжения пересекают ось температур ( $p = 0$ ) в точке с координатами  $(0, -1/\beta)$ . Как и в случае изобар (*рис. 1.11*), в области низких температур изохоры изображены штриховой линией, так как при низких температурах вещество не находится в газообразном состоянии и закон Шарля (1.23) не применим.

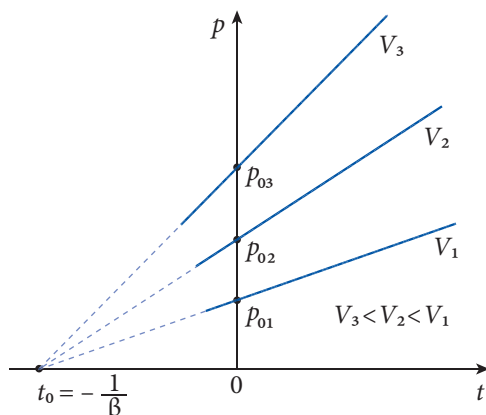


Рис. 1.12



**г. Законы Гей-Люссака и Шарля, выраженные через абсолютную температуру**

При изучении законов Гей-Люссака и Шарля мы заметили, что продолжения изобар и изохор пересекают ось температур в одной и той же точке,  $t_0 = -1/\alpha = -1/\beta$  (рис. 1.11 и 1.12). Чтобы понять, что это означает, проанализируем законы с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

Известно, что тепловое беспорядочное движение молекул тем интенсивней, чем выше температура вещества. В случае изохорного процесса с повышением температуры растет интенсивность теплового движения молекул и число их ударов о внутреннюю поверхность сосуда с газом за единицу времени. Так как при каждом ударе молекулы поверхности сосуда передается определенный импульс, то растет и сила давления газа на стенки сосуда, а значит, и само давление газа. При уменьшении температуры ослабляется интенсивность теплового движения молекул и давление газа уменьшается.

При изобарном процессе уменьшение температуры приводит к уменьшению объема, занимаемого газом. В самом деле, если ослабляется тепловое движение молекул, то уменьшается и сила, действующая на каждую единицу площади внутренней поверхности сосуда, то есть давление. Но так как давление по условию неизменно (процесс изобарный!), то тогда должно возрасти число ударов молекул на единицу площади стенки сосуда, что возможно при уменьшении объема, занимаемого газом.

Рассмотрим идеальный газ, всегда остающийся в газообразном состоянии. Согласно молекулярно-кинетической теории из законов Гей-Люссака и Шарля следует, что при температуре, равной абсолютному нулю, объем в изобарном процессе идеального газа и давление в изохорном станут равными нулю. Итак, при этой температуре, из уравнений (1.21) и (1.23) получится:

$$0 = V_0 (1 + \alpha t_0) \quad \text{и} \quad 0 = p_0 (1 + \beta t_0),$$

откуда имеем:

$$t_0 = -\frac{1}{\alpha} = -\frac{1}{\beta} = -273,15 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Из определения абсолютной температуры видна (п. 1.7) связь между температурными шкалами Цельсия и Кельвина:

$$T = \frac{1}{\alpha} + t = \frac{1}{\beta} + t; \tag{1.24}$$

Обозначая  $T_0 = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} = 273,15 \text{ К}$ , получим:

$$T = 273,15 + t \text{ (} ^\circ\text{C)},$$

что находится в соответствии с (1.10).

Итак, шкалы Кельвина и Цельсия сдвинуты одна относительно другой для любых значений температур на  $T_0$  и изменение температуры на 1 К равнозначно изменению на 1  $^\circ\text{C}$ .

Если использовать абсолютную шкалу температур, то уравнение (1.21) становится очень простым. Действительно, с помощью выражения (1.24) получим:

$$V = V_0 \alpha \left( \frac{1}{\alpha} + t \right) = V_0 \alpha T, \quad \text{откуда} \quad \frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0}.$$

Закон Гей-Люссака можно сформулировать и так:

Для данной массы газа ( $m = \text{const}$ ) в изобарном процессе отношение между объемом и абсолютной температурой постоянно:

$$\frac{V}{T} = \text{const}, \quad \text{для} \quad m = \text{const}, \quad p = \text{const}. \quad (1.25)$$

Закон Шарля формулируется соответственно:

Для данной массы газа ( $m = \text{const}$ ) в изохорном процессе отношение между давлением и абсолютной температурой постоянно:

$$\frac{p}{T} = \text{const}, \quad \text{для} \quad m = \text{const}, \quad V = \text{const}. \quad (1.26)$$

В координатах  $V, T$  и  $p, T$  графики изобарного и изохорного процессов выглядят проще: их продолжения проходят через начало координат (рис. 1.13 и рис. 1.14).

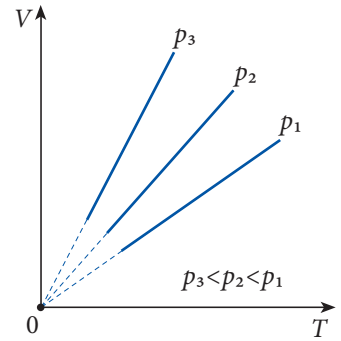


Рис. 1.13

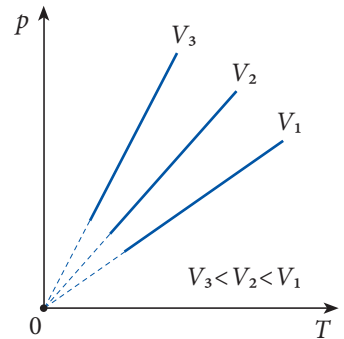


Рис. 1.14

#### д. Термическое уравнение состояния идеального газа

В каждом из рассмотренных газовых законов один из параметров состояния был постоянен. На практике очень часто меняются все параметры газа. Связь между этими параметрами можно описать уравнением, содержащим все газовые законы как частные случаи.

Пусть некий газ, находящийся в состоянии 1 с параметрами  $p_1, V_1$  и  $T_1$ , переводится в состояние 2 с параметрами  $p_2, V_2$  и  $T_2 > T_1$  произвольным способом 1–2.

В системе координат  $p, V$  эти состояния представлены точками 1 и 2 (рис. 1.15). Если процесс равновесный, то уравнение, описывающее состояние 2, не зависит от способа перевода газа в это состояние. Докажем это, переведем газ из состояния 1 в состояние 2, один раз совершив переход 1–1'–2 через промежуточное состояние 1' с координатами  $p_1, V', T_2$ , и второй раз – переход 1–2'–2 через состояние 2' с координатами  $p_2, V'', T_1$ . Переход 1–1'–2 осуществим с помощью двух простых процессов: сначала изобарного, затем изотермического, описываемых уравнениями:

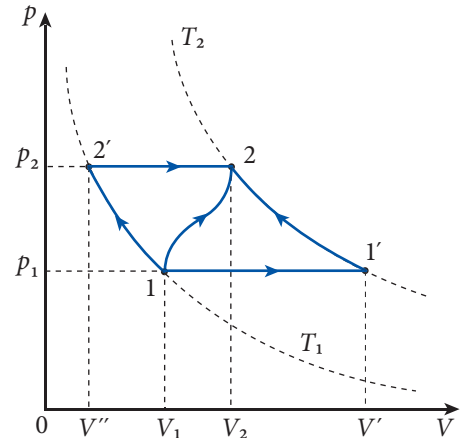


Рис. 1.15

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V'}{T_2} \quad \text{и} \quad p_1 V' = p_2 V_2.$$

Если подставить параметр промежуточного состояния  $V'$  из одного уравнения в другое, получим:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (1.27)$$

В переходе 1–2'–2 сначала осуществляется изотермический процесс, а затем изобарный:

$$p_1 V_1 = p_2 V'' \quad \text{и} \quad \frac{V''}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}.$$

После исключения параметра промежуточного состояния  $V''$  получим то же уравнение (1.27). Итак, если при переходе газа через два различных промежуточных состояния получены одинаковые результаты, то, значит, и при использовании любого третьего промежуточного состояния будет получено уравнение (1.27).

Впервые этот результат был получен в 1834 году французским физиком Б. Клапейроном (1799–1864).

**Отношение произведения давления на объем данной массы газа ( $m=\text{const}$ ) к его абсолютной температуре есть величина постоянная.**

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad (m = \text{const}). \quad (1.28)$$

Исследования высокой точности показали, что уравнение Клапейрона справедливо для любого газа независимо от его природы при давлениях порядка атмосферного (или ниже) и температурах значительно выше температур сжижения газов. Газ, находящийся в таких условиях, можно считать приближенно идеальным.

Запишем уравнение (1.28) для одного моля газа, взятого сначала при нормальных условиях:

$$\frac{p_0 V_{M0}}{T_0} = \frac{p V_M}{T}.$$

Выражение в правой части уравнения постоянно и не зависит от природы газа. Оно обозначается буквой  $R$  и называется **универсальной газовой постоянной**. В нормальных условиях  $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ ,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , значит,  $T_0 = 273,15 \text{ К}$  и  $V_{M0} = 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ , поэтому значение постоянной:

$$R = \frac{1,01325 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot 22,41 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}}{273,15 \text{ К}} \approx 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Уравнение состояния для одного моля газа примет вид:

$$pV_M = RT. \quad (1.29)$$

Уравнение (1.29) впервые получено русским химиком Д.И. Менделеевым (1834–1907) и поэтому называется уравнением Клапейрона–Менделеева для одного моля газа.

Для  $\nu$  молей газа  $V = \nu V_M$  и уравнение (1.29) запишется так:

$$pV = \nu RT.$$

Так как  $v = \frac{m}{M}$ , где  $m$  – масса газа, а  $M$  – его молярная масса, то уравнение Клапейрона–Менделеева примет вид:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (1.30)$$

Уравнение (1.30) получено опытным путем и совпадает с выражением (1.16), полученным из основного уравнения молекулярно-кинетической теории. Оно выражает зависимость между параметрами состояния газа, находящегося в тепловом равновесии, и поэтому называется **термическим уравнением состояния** идеального газа.

Из уравнения Клапейрона–Менделеева легко получаются все газовые законы, изученные ранее. Действительно, считая постоянным один из трех параметров состояния, из (1.30) получим:

$$pV = \text{const} = \frac{m}{M} RT, \quad (m, T - \text{const}) \quad \text{— закон Бойля–Мариотта};$$

$$\frac{V}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} R \cdot \frac{1}{p}, \quad (m, p - \text{const}) \quad \text{— закон Гей-Люссака};$$

$$\frac{p}{T} = \text{const} = \frac{m}{M} R \cdot \frac{1}{V}, \quad (m, V - \text{const}) \quad \text{— закон Шарля}.$$

Уравнение состояния позволяет найти плотность газа как функцию давления и температуры газа. Используя определение плотности  $\rho = m/V$  и уравнение (1.30), запишем:

$$\rho = \frac{Mp}{RT}. \quad (1.31)$$

Найдем давление смеси различных газов. Из (1.14) имеем:

$$pV = NkT = (N_1 + N_2 + \dots + N_j) kT,$$

где  $p$  – давление газов, а  $N_1, N_2, \dots, N_j$  – количество молекул из 1, 2, ...  $j$  составляющих смеси. Для каждой составляющей смеси  $p_j V = N_j k T$ , где  $p_j$  – это парциальное давление составляющей  $j$ , т.е. давление, которое оказывали бы  $N_j$  молекул этого газа при отсутствии остальных составляющих этой смеси различных газов. Тогда для смеси газов получим:  $pV = (p_1 + p_2 + \dots + p_j) V$  или, сократив на  $V$ , получим:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_j. \quad (1.32)$$

Уравнение (1.32), называемое законом Дальтона для смеси газов, было получено сначала опытным путем.

**Давление смеси газов равно сумме парциальных давлений.**

Из уравнений (1.30) и (1.32) можно получить уравнение Клапейрона–Менделеева для смеси газов:

$$pV = \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_j}{M_j} \right) RT,$$

где  $p$  – давление смеси.

**Пример решения задачи**

**1**

<b>Дано:</b> $h = 30$ см, $L = 1$ м, $p_1 = 40$ кПа, $\rho = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	СИ: 0,3 м, $4 \cdot 10^4$ Па
$x - ?$	м

В середине стеклянной горизонтальной трубки, запаянной с обоих концов, находится столбик ртути длиной  $h = 30$  см. Зная, что длина трубки  $L = 1$  м, а давление в ней  $p_1 = 40$  кПа, определите, на сколько опустится столбик ртути, если трубку установить вертикально? Плотность ртути  $\rho = 13,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

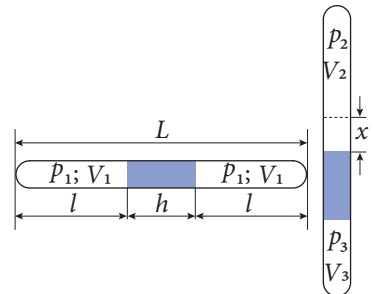


Рис. 1.16

**Решение**

В обеих частях горизонтальной трубки у газа одинаковые параметры: давление  $p_1$  и объем  $V_1 = \frac{L-h}{2} S$ , где

$S$  – площадь поперечного сечения трубки (рис. 1.16).

Когда трубку переводят в вертикальное положение, газ претерпевает изотермическое превращение: в

верхней части расширяется до объема  $V_2 = \left(\frac{L-h}{2} + x\right) S$ , а в нижней он сжат до объема

$V_3 = \left(\frac{L-h}{2} - x\right) S$ , где  $x$  – расстояние, на которое перемещается столбик ртути. Давление в обеих частях обозначим через  $p_2$  и  $p_3$ . Столбик ртути будет в равновесии, если  $p_3 = p_2 + \rho gh$ , где  $\rho$  плотность ртути, а  $g = 10$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Запишем закон Бойля–Мариотта для верхней и нижней порции газа:

$$p_1 \frac{L-h}{2} S = p_2 \left(\frac{L-h}{2} + x\right) S; \quad p_1 \frac{L-h}{2} S = (p_2 + \rho gh) \left(\frac{L-h}{2} - x\right) S.$$

Отсюда получим уравнение второй степени относительно  $x$ :

$$x^2 + \frac{p_1(L-h)}{\rho gh} x - \frac{1}{4}(L-h)^2 = 0 \quad \text{с решениями:} \quad x_{1,2} = \frac{(L-h)p_1}{2\rho gh} \left[ -1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{\rho gh}{p_1}\right)^2} \right].$$

Так как  $x$  не может быть отрицательным, столбик ртути опускается вниз на:

$$x = \frac{(L-h)p_1}{2\rho gh} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\rho gh}{p_1}\right)^2} - 1 \right]; \quad x \approx 15 \text{ см.}$$

**Пример решения задачи**

**2**

<b>Дано:</b> $l = 20$ см, $r = 0,5$ см, $t_1 = 100$ °С, $t_2 = 17$ °С, $\rho = 13,6 \cdot 10^3$ кг/м <sup>3</sup>	СИ: 0,2 м, $5 \cdot 10^{-3}$ м, 373 К, 290 К
$m - ?; \Delta l - ?$	кг; м

Стеклянная трубка, запаянная с одного конца, длиной  $l = 20$  см и радиусом  $r = 0,5$  см нагрета до  $100$  °С. В горизонтальном положении ее открытый конец вводится в каплю ртути ( $\rho = 13,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Найти длину и массу столбика ртути, вошедшей в трубку после ее охлаждения до температуры комнаты, равной  $17$  °С.

## Решение

После введения открытого конца трубки в каплю ртути образуется изолированная масса воздуха с объемом  $V_1$  и температурой  $T_1$ . Так как трубка горизонтальна, то давление воздуха в ней примерно равно атмосферному и не меняется при изменении температуры. Мы имеем дело с изобарным процессом.

Если обозначить температуру комнаты через  $T_2$  объем воздуха в трубке при этой температуре через  $V_2$  (рис. 1.17), то по закону Гей-Люссака:

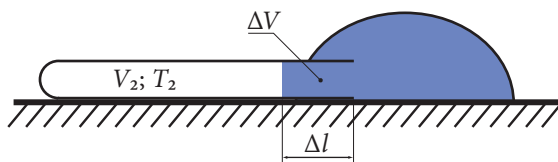


Рис. 1.17

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

Объем ртути, вошедшей в трубку  $\Delta V = V_1 - V_2 = V_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$ , откуда  $\Delta l = \frac{\Delta V}{S} = l \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$ ;  $\Delta l \approx 4$  см.

Используя определение плотности ( $\rho = m/V$ ), для массы ртути, вошедшей в трубку, запишем:

$$m = \rho \Delta V = \rho S \Delta l = \pi r^2 \Delta l;$$

$$m \approx 42,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 42,7 \text{ г}.$$

### Пример решения задачи

3

**Дано:**

$$p_1 = 2,5 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

$$t_1 = 17^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 57^\circ\text{C},$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Па}$$

СИ:

$$290 \text{ К},$$

$$330 \text{ К}$$

Давление воздуха в шинах автомобиля  $p_1 = 2,5 \cdot 10^5$  Па при температуре  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ . Во сколько раз уменьшится площадь контакта колес с дорогой, если во время движения температура воздуха в шинах возросла до  $57^\circ\text{C}$ ? Считать атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па, а изменение объема шин незначительным.

$$\frac{S_1}{S_2} - ?$$

## Решение

Так как объем шин во время движения практически не меняется, то речь идет об изохорном процессе и, согласно закону Шарля,  $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ , где  $p_2$  — давление газа при температуре  $T_2 = 330$  К.

Поскольку сила  $F$ , с которой колеса нажимают на дорогу, одинакова в обоих случаях (равна весу автомобиля  $P$ ), является разницей между внутренним давлением  $p$  и внешним давлением  $p_0$ , и определяется давлением  $p = F/S$ , получим:

$$F = P = (p_1 - p_0)S_1,$$

$$F = P = (p_2 - p_0)S_2,$$

откуда имеем:  $\frac{S_1}{S_2} = \frac{p_2 - p_0}{p_1 - p_0}$ .

Здесь  $S_1$  и  $S_2$  площади поверхности контактов колес с дорогой в обоих случаях.

Выразив давление  $p_2$ , с помощью закона Шарля, для отношения  $S_1/S_2$  получим:

$$\frac{S_1}{S_2} \approx \frac{p_1 T_2 - p_0 T_1}{T_1(p_1 - p_0)}; \quad \frac{S_1}{S_2} \approx 1,23.$$

### Пример решения задачи

4

#### Дано:

$t_1 = 27^\circ\text{C}$ ,  
 $p_1 = p_0 = 10^5 \text{ Па}$ ,  
 $h = 10 \text{ м}$ ,  
 $t_2 = 4^\circ\text{C}$ ,  
 $g = 10 \text{ м/с}^2$ ,  
 $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$

#### СИ:

300 К,  
 277 К

Резиновая камера заполнена воздухом при температуре  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении  $p_1 = p_0 = 10^5 \text{ Па}$ . Во сколько раз уменьшится объем воздуха в камере, если ее опустить в воду на глубину  $h = 10 \text{ м}$ , где температура воды  $t_2 = 4^\circ\text{C}$ ? Считать ускорение свободного падения  $g = 10 \text{ м/с}^2$  и плотность воды  $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

$\frac{V_1}{V_2} - ?$

### Решение

При погружении камеры в воду имеет место превращение, в результате которого меняются все параметры состояния воздуха в камере согласно уравнению (1.28):

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (1.33)$$

Давление воздуха в камере  $p_2$  на глубине  $h$  находится из условия равновесия, оно равно сумме атмосферного давления  $p_0$  и гидростатического давления  $\rho gh$ .

Получаем:  $p_2 = (p_0 + \rho gh)$ .

Из (1.33) получим:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{(p_0 + \rho gh) T_1}{p_0 T_2} = \left(1 + \frac{\rho gh}{p_0}\right) \frac{T_1}{T_2}; \quad \frac{V_1}{V_2} \approx 2,2.$$

### Пример решения задачи

5

#### Дано:

$V_1 = 50 \text{ см}^3$ ,  
 $V_2 = 150 \text{ см}^3$ ,  
 $p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ,  
 $p_2 = 10^5 \text{ Па}$ ,  
 $T_1 = 330 \text{ К}$ ,  
 $T_2 = 273 \text{ К}$ ,  
 $T = 300 \text{ К}$

#### СИ:

$5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ ,  
 $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$

Сосуд поделен стенкой на две части объемами  $V_1 = 50 \text{ см}^3$  и  $V_2 = 150 \text{ см}^3$ . В одной части находится идеальный газ массой  $m_1$  под давлением  $p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и с температурой  $T_1 = 330 \text{ К}$ , а в другой – этот же газ массой  $m_2$  под давлением  $p_2 = 10^5 \text{ Па}$  и с температурой  $T_2 = 273 \text{ К}$ . Каким станет давление газа после удаления разделяющей стенки, если температура газа станет  $T = 300 \text{ К}$ ?

$p - ?$

Па

### Решение

После удаления стенки газ занимает весь сосуд объемом  $V_1 + V_2$ , имея массу  $m_1 + m_2$ .

Согласно уравнению Клапейрона–Менделеева  $p(V_1 + V_2) = \frac{m_1 + m_2}{M} RT$ , откуда давление  $p = \frac{(m_1 + m_2) RT}{M(V_1 + V_2)}$ , где  $M$  – молярная масса газа. Используя уравнение Клапейрона–Менделеева для газа в каждой части сосуда, запишем:

$$m_1 = \frac{p_1 V_1 M}{RT_1}; \quad m_2 = \frac{p_2 V_2 M}{RT_2}.$$

Сложим эти выражения и, подставив в формулу для давления  $p$ , получим:

$$p = \left( \frac{p_1 V_1}{T_1} + \frac{p_2 V_2}{T_2} \right) \frac{T}{V_1 + V_2}; \quad p \approx 1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

## Пример решения задачи

6

**Дано:**

$$T_1 = 300 \text{ К},$$

$$T_3 = 600 \text{ К}$$

$$T_2 = ?$$

Идеальный газ совершает цикл, представленный на рисунке 1.18. Определите температуру в состоянии 2, если в состояниях 1 и 3 она равна 300 К и 600 К, соответственно.

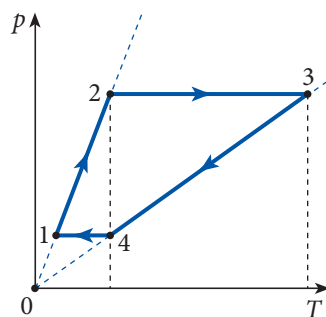


Рис. 1.18

## Решение

Из рисунка 1.18 видно, что состояния 2 и 4 находятся на одной изотерме, т.е.  $T_2 = T_4$ . Одновременно видно, что цикл состоит из изобар  $2 \rightarrow 3$  и  $4 \rightarrow 1$ , и изохор  $1 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 4$ .

Используя закон изохорного превращения (1.26), можем записать:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}; \quad \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_4}{T_4}.$$

Поскольку  $p_2 = p_3$ ,  $p_4 = p_1$  и  $T_2 = T_4$ , то равенства принимают вид:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_3}{T_2}; \quad \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_1}{T_2}.$$

Умножим почленно равенства и получим:

$$\frac{p_1 p_3}{T_1 T_3} = \frac{p_1 p_3}{T_2^2},$$

откуда

$$T_2 = \sqrt{T_1 T_3} \approx 424,3 \text{ К}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Сформулируйте закон Бойля–Мариотта. Как его можно объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
2. Постройте график изотермического процесса идеального газа в координатах  $p$  и  $V$ ;  $V$  и  $t$ ;  $p$  и  $t$ . Как изображаются изотермы для газов одинаковой массы, но разной температуры?



3. Сформулируйте закон Гей-Люссака. Что представляет собой температурный коэффициент объемного расширения?
4. Сформулируйте закон Шарля. Что представляет собой температурный коэффициент давления?
5. Как объясняются законы Гей-Люссака и Шарля с молекулярно-кинетической точки зрения?
6. Постройте график изобарного процесса для данной массы идеального газа в координатах  $p$  и  $V$ ;  $V$  и  $T$ ;  $p$  и  $T$ . Как расположены изобары данной массы газа при различных давлениях?
7. Постройте график изохорного процесса для некоторой массы идеального газа в координатах  $p$  и  $V$ ;  $V$  и  $T$ ;  $p$  и  $T$ . Как будут расположены изохоры данной массы газа при различных объемах?
8. Напишите уравнения Клапейрона и Клапейрона–Менделеева. Чем они отличаются?
9. Постройте график зависимости плотности идеального газа от абсолютной температуры при изобарном процессе и зависимости плотности идеального газа от давления при изотермическом процессе.

10. Идеальный газ подвергается процессам, показанным на *рисунке 1.19*. Представьте графически эти процессы в координатах  $(p, V)$  и  $(V, T)$ .

11. Пузырек воздуха поднимается со дна водоема на поверхность. Чему равна глубина водоема, если объем пузырька удвоился за время подъема к поверхности? Температура воды на всех глубинах одинакова. Атмосферное давление считать нормальным.

12. В горизонтальной трубке, запаянной с одной стороны, находится столбик ртути длиной 10 см, запирающий воздух объемом 453 мм<sup>3</sup>. Если трубку перевести в вертикальное положение отверстием вверх, объем воздуха уменьшится до 400 мм<sup>3</sup>. Чему равно атмосферное давление? Плотность ртути  $\rho = 13,6 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

13. В изотермическом процессе давление идеального газа возросло на 20 кПа. Чему равно конечное давление газа, если его объем уменьшился в  $n = 3$  раза?

14. Газ при температуре 273 К занимает объем 5 м<sup>3</sup>. Чему равен объем газа при температуре 273°C при том же давлении?

15. Температура газа, закрытого поршнем в горизонтальном цилиндре, возросла в  $n = 2,5$  раза. На сколько переместится поршень в результате нагрева, если вначале он находился на расстоянии  $L = 20$  см от дна цилиндра? Давление газа считать постоянным.

16. Идеальный газ изобарно нагрели на 150°C. Чему была равна начальная температура газа, если его плотность уменьшилась в 1,5 раза?

17. Газ в закрытом баллоне нагрели от 0 до 100°C. Давление его при этом возросло на 0,37 МПа. Каким было начальное давление газа?

18. В горизонтальной трубке с поперечным сечением  $S = 3$  см<sup>2</sup> находятся в равновесии два легких поршня, ограничивающих от внешней среды определенный объем газа с температурой 300 К. Поршни соединены друг с другом нитью, выдерживающей максимальную нагрузку в 20 Н. До какой температуры можно нагреть газ между поршнями, чтобы нить не порвалась? Атмосферное давление  $p_0 = 10^5$  Па. Поршни двигаются без трения.

19. В вертикальном цилиндре с площадью поперечного сечения  $S = 20$  см<sup>2</sup>, закрытом поршнем пренебрежимо малой массы, находится идеальный газ под давлением  $p_0 = 10^5$  Па и с

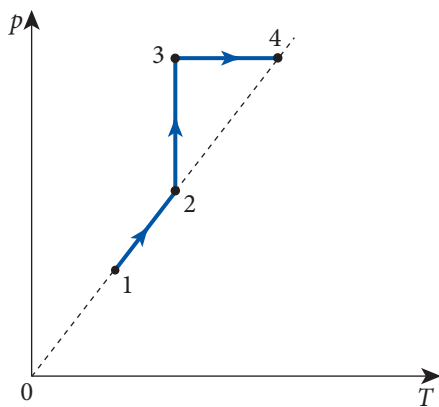


Рис. 1.19

температурой  $T_1 = 290$  К. Газ нагревают до  $t_2 = 162$  °С. Какой массы груз нужно положить на поршень, чтобы сохранился первоначальный объем газа?

20. Как изменяется объем идеального газа при совершении одного цикла процесса, выполняемого так, как показано на рисунке 1.20? Покажите на графике точки, соответствующие минимальному и максимальному объемам этого процесса

21. Идеальный газ занимает объем  $V_1 = 20$  л под давлением  $p_1 = 10^5$  Па с температурой  $t_1 = 17$  °С. Каким станет давление этой массы газа при температуре  $t_2 = 100$  °С, если занимаемый объем  $V_2 = 10$  л?

22. В цилиндре двигателя внутреннего сгорания в начале такта сжатия давление газообразного топлива  $p_1 = 10^5$  Па, а температура  $T_1 = 330$  К. Определите его температуру в конце такта сжатия, если объем уменьшится в  $n = 4$  раза, а давление возрастет до  $8 \cdot 10^5$  Па.

23. Идеальный газ расширяется по закону: а)  $p = \text{const}$ ; б)  $pV^2 = \text{const}$ ; в)  $p/V = \text{const}$ . Что происходит с газом при таких превращениях: он нагревается или охлаждается?

24. В баллоне объемом 25 л находится 1 кг кислорода под давлением 3 МПа. Вычислите температуру кислорода.

25. Определите плотность азота при температуре  $t = 7$  °С и давлении  $p = 83$  кПа.

26. В нормальных условиях газ массой 1,77 г занимает объем 10 л. Найдите молярную массу газа. Как называется этот газ?

27. Сосуд объемом 300 см<sup>3</sup> разделен на две равные части пористой перегородкой. В одной половине находится 28 мг азота, в другой – 32 мг кислорода. Определите, какое давление установится в каждой из двух частей сосуда, если сквозь перегородку могут проникать только молекулы азота. Температура в сосуде поддерживается равной 300 К.

28. Найдите плотность смеси из 4 г гелия и 28 г азота при температуре 300 К и давлении 100 кПа.

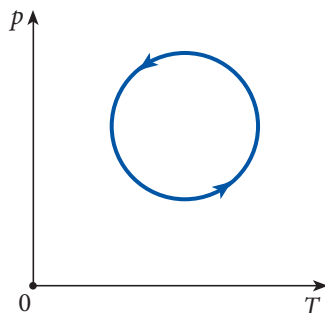


Рис. 1.20

# ТЕСТЫ ДЛЯ ИТОГОВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

## РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:	
	а) В изотермическом процессе ... массы газа ...	1 б.
	б) Относительное изменение объема данной массы газа ... прямо ... температуре.	1 б.
	в) Произведение давления на объем одного моля идеального газа ...	1 б.
2	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно.	
	а) Число молекул в одном моле зависит от количества вещества.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	б) Между молекулами вещества одновременно действуют силы взаимного притяжения и отталкивания.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	в) При совершении идеальным газом изобарного процесса увеличение объема сопровождается уменьшением температуры.	<input type="checkbox"/> 1 б.
	Задания 3 и 4 состоят из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).	
3	Давление, объем и температура связаны зависимостью, которая описывает равновесное состояние данного количества идеального газа, так как термодинамические параметры $p$ , $V$ и $T$ являются независимыми физическими величинами.	
	Ответ:	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	
4	При возрастании температуры идеального газа в четыре раза, скорости молекул газа увеличиваются в два раза, так как температура является мерой теплового движения молекул.	
	Ответ:	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	

5	Идеальный газ находится при нормальном атмосферном давлении. Чему равна плотность газа, если тепловая скорость его молекул равна 600 м/с?	2 б.
6	При изотермическом сжатии идеального газа от объема $V_1 = 30$ л до объема $V_2 = 10$ л, его давление увеличилось на 50 Па. Чему было равно первоначальное давление газа?	2 б.
7	В сосуде объемом 1 л при температуре $27^\circ\text{C}$ находится $6 \cdot 10^{22}$ молекул азота и 6,4 г кислорода. Вычислите:	
	а) давление смеси газов;	3 б.
	б) объем, занимаемый смесью, если в изобарном процессе температура возросла на $100^\circ\text{C}$ .	3 б.
8	В закрытом сосуде объемом $V = 10$ л при температуре $T_1 = 27^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 3$ МПа находится кислород. Найдите:	
	а) массу кислорода в сосуде;	2 б.
	б) сколько молей кислорода необходимо выпустить из сосуда, чтобы при постоянной температуре давление упало до $p_2 = 300$ кПа;	3 б.
	в) какую массу газа необходимо выпустить дополнительно из сосуда, чтобы при повышении его температуры до $T_3 = 127^\circ\text{C}$ давление $p_2$ осталось неизменным;	3 б.
	г) значение средней квадратичной скорости молекул в начальном состоянии и отношение средних кинетических энергий молекул, соответствующих температурам $T_3$ и $T_1$ .	3 б.

## ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:	
	а) Единицей количества вещества является ... и это – одна из ... СИ.	1 б.
	б) Давление газа ... средней кинетической энергии поступательного движения всех молекул единицы объема.	1 б.
	в) В изобарном процессе данной массы идеального газа отношение ... к ... остается постоянным.	1 б.
2	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно.	
	а) Изменение температуры, выраженное в градусах Цельсия, численно равно изменению температуры, выраженному в градусах Кельвина. <input type="checkbox"/>	1 б.
	б) Уравнение состояния идеального газа выражает связь между макроскопическими параметрами данного количества газа. <input type="checkbox"/>	1 б.
	в) При изохорном нагревании данной массы газа его давление уменьшается. <input type="checkbox"/>	1 б.
	Задания 3 и 4 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ), каждое из утверждений и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).	
3	Идеальный газ можно считать системой свободно движущихся материальных точек, так как молекулы идеального газа находятся в непрерывном хаотическом движении.	
	Ответ:	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	
4	При увеличении температуры данной массы идеального газа в изохорном процессе его давление растет, так как при более высоких температурах число соударений молекул с единицей поверхности сосуда с газом за единицу времени становится больше.	
	Ответ:	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	

5	При давлении 200 кПа концентрация молекул идеального газа в некотором сосуде равна $3 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Определите среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы этого газа.	2 б.
6	42 г газа, находящегося при нормальных давлении и температуре, занимает объем $V = 30 \text{ л}$ . Чему равна молярная масса этого газа?	2 б.
7	В сосуде находится кислород под давлением 200 кПа при температуре 300 К. Средняя кинетическая энергия поступательного движения всех молекул кислорода равна 12,42 кДж. Определите:	
	а) массу кислорода в сосуде;	3 б.
	б) объем сосуда.	3 б.
8	Два сосуда соединены трубкой с краном. В одном из них содержится 1 кмоль водорода под давлением 4 МПа при температуре 300 К, а второй откачан. После открывания крана давление и температура водорода стали равными 2 МПа и, соответственно, 270 К. Определите:	
	а) массу водорода и объем первого сосуда;	3 б.
	б) плотность водорода до открытия крана;	2 б.
	в) объем второго сосуда;	3 б.
	г) отношение тепловых скоростей молекул водорода до и после открытия крана.	3 б.

# ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

## 2.1 ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

### а. Внутренняя энергия – функция состояния

Макроскопические системы, изучаемые в молекулярной физике и термодинамике, находятся, как правило, в покое. Их механическая энергия не меняется. Энергетические преобразования в тепловых явлениях сопровождаются изменениями энергии, обусловленной внутренней структурой вещества и называемой **внутренней энергией**.

Согласно определению,

**внутренняя энергия  $U$  термодинамической системы равна сумме кинетических энергий движения молекул и потенциальных энергий взаимодействия между ними.**

Обозначим через  $E_k$  сумму кинетических энергий и через  $E_p$  сумму потенциальных энергий молекул. Тогда внутренняя энергия

$$U = E_k + E_p. \quad (2.1)$$

Существуют и другие формы энергии, связанные с внутренней структурой термодинамической системы. Например, кинетическая энергия движения электронов в атомах вокруг своих ядер, потенциальная энергия притяжения электронов к ядрам и взаимного отталкивания электронов и другие, о которых вы узнаете позже. Тепловые явления не изменяют структуру молекул. Так, при нагревании и плавлении льда, нагревании получившейся воды и затем превращении ее в пар молекулы воды остаются теми же, изменяется лишь характер их движения и взаимодействия. Следовательно, энергии, соответствующие движению и взаимодействию внутри молекул, не изменяются и не влияют на течение тепловых процессов. Из курса механики вы знаете, что потенциальная энергия определяется с точностью до выбранной постоянной, величина которой, однако, не играет никакой роли, так как при вычислении изменения потенциальной энергии (именно она связана с механической работой) постоянные взаимно уничтожаются. Это как раз и объясняет, почему в определении

внутренней энергии (2.1) ограничились только энергией, связанной с движением и взаимодействием молекул.

Из молекулярно-кинетической теории вы знаете, что кинетические энергии молекул определяются температурой  $T$ . Следовательно, сумма кинетических энергий молекул системы является функцией ее температуры:  $E_k = E_k(T)$ .

Из механики вы знаете, что потенциальная энергия взаимодействия тел зависит от их взаимного расположения, расстояния между ними. С другой стороны, расстояния между молекулами зависят от объема  $V$  системы: при увеличении объема данной массы газа расстояния между молекулами увеличиваются. Итак, сумма потенциальных энергий взаимодействия между молекулами есть функция объема системы  $E_n = E_n(V)$ .

Выражение (2.1) примет вид:

$$U = E_k(T) + E_n(V), \quad (2.2)$$

то есть внутренняя энергия зависит от объема системы и ее температуры:

$$U = U(V, T). \quad (2.3)$$

Уравнение (2.3) называется **калорическим уравнением состояния**. Кинетическая и потенциальная энергии, как вы знаете из механики, являются функциями состояния, то есть зависят от состояния системы, которую характеризуют. Значит, и **внутренняя энергия является функцией состояния**, то есть ее величина определяется состоянием системы, ее объемом и температурой на данный момент, и не зависит от состояния, в котором находилась система до этого. Следовательно, **изменение внутренней энергии системы при переходе из начального состояния 1**, характеризующегося параметрами  $V_1$  и  $T_1$ , **в конечное состояние 2**, характеризующееся параметрами  $V_2$  и  $T_2$ , **не зависит от пути (процесса) перехода из состояния 1 в состояние 2**. Изменение равно:

$$\Delta U_{12} = U(V_2, T_2) - U(V_1, T_1).$$

Обозначив  $U(V_1, T_1) = U_1$  и  $U(V_2, T_2) = U_2$ , запишем:

$$\Delta U_{12} = U_2 - U_1. \quad (2.4)$$

**Процесс, в котором конечное состояние системы совпадает с начальным, называется круговым процессом (циклом).**

Другими словами, в конце кругового процесса система возвращается в начальное состояние. Из (2.4) следует, что изменение внутренней энергии системы, совершившей круговой процесс,

$$\Delta U_{\text{цикл.}} = 0. \quad (2.5)$$

## 6. Внутренняя энергия идеального одноатомного газа

Знание калорического уравнения состояния (2.3) необходимо для описания тепловых свойств термодинамических систем и происходящих в них явлений. Но вывести выражение для внутренней энергии очень трудно, в основном из-за сложного характера взаимодействия молекул. Поэтому мы ограничимся только случаем идеального газа, молекулы которого не взаимодействуют на расстоянии.

Итак, потенциальная энергия взаимодействия между молекулами идеального газа равна нулю:  $E_n(V) = 0$ . Из (2.3) следует:



$$U^{\text{ид.}} = U_{\text{к}}(T) = E_{\text{к}}(T), \quad (2.6)$$

то есть **внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры**. Этот результат был впервые получен опытным путем английским физиком Д. Джоулем и сформулирован в таком виде:

**Внутренняя энергия идеального газа при постоянной температуре не зависит от объема.**

Называется он **законом Джоуля** и равносильно выражению (2.6).

В рамках молекулярно-кинетической теории идеального газа было получено выражение для средней кинетической энергии поступательного движения молекулы (1.12):

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{3}{2} kT. \quad (2.7)$$

Молекула, состоящая из двух или более атомов, совершает не только поступательное движение, но и вращательное движение вокруг осей, проходящих через ее центр, то есть она обладает и кинетической энергией вращения.

Мы ограничимся случаем одноатомных молекул, какими являются молекулы инертных газов: гелия, аргона, неона и др. Они не обладают кинетической энергией вращения (при вращении вокруг оси точки на этой оси остаются в покое). Следовательно, формула (2.7) выражает всю среднюю кинетическую энергию молекулы одноатомного идеального газа. С другой стороны, согласно определению, средняя кинетическая энергия молекулы равна сумме всех кинетических энергий молекул, деленной на их число:

$$\bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{E_{\text{к}}(T)}{N}. \quad (2.8)$$

Из выражений (2.6), (2.7) и (2.8) получим:

$$U^{\text{ид.}} = E_{\text{к}}(T) = N\bar{\epsilon}_{\text{пост.}} = \frac{3}{2} NkT$$

или

$$U^{\text{ид.}} = \frac{3}{2} NkT. \quad (2.9)$$

Это выражение для внутренней энергии идеального одноатомного газа.

Число молекул  $N = \nu N_A$ , где  $\nu$  – количество вещества ( $\nu = m/M$ ) и  $N_A$  – постоянная (число) Авогадро. Формулу (2.9) запишем в виде:  $U^{\text{ид.}} = \frac{3}{2} \nu N_A kT$ . Но  $N_A k = R$  – универсальная газовая постоянная. Получим:

$$U^{\text{ид.}} = \frac{3}{2} \nu RT = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (2.10)$$

Уравнение (2.10) называется **калорическим уравнением состояния идеального одноатомного газа**.

Изменение внутренней энергии в соответствии с (2.10) равно:

$$\Delta U^{\text{ид.}} = \frac{3}{2} \nu R \cdot \Delta T. \quad (2.11)$$

Используя термическое уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона–Менделеева) (1.30), можем записать калорическое уравнение состояния в виде:

$$U^{\text{ид.}} = \frac{3}{2} pV. \quad (2.10, a)$$

Будем использовать то или иное выражение в зависимости от того, какие величины нам известны.

### Пример решения задачи

**Дано:**

$$n = 5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3},$$

$$V = 2 \text{ л},$$

$$T = 300 \text{ К}$$

$U - ?$

**СИ:**

$$2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Дж

Одноатомный идеальный газ с концентрацией  $n = 5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$  занимает объем 2 л при температуре 300 К. Чему равна внутренняя энергия этого газа?

### Решение

Согласно соотношению (2.10, а) внутренняя энергия газа равна:

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

Давление газа определяется с помощью основного уравнения молекулярно-кинетической теории:

$$p = nkT,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$  – постоянная Больцмана.

Таким образом, для внутренней энергии получаем:

$$U = \frac{3}{2} nkTV = \frac{3}{2} \cdot 5 \cdot 10^{24} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 62,1 \text{ Дж}.$$

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Дайте определение внутренней энергии термодинамической системы.
2. Какие параметры (величины), характеризующие термодинамическую систему, определяют ее внутреннюю энергию?
3. Как вы понимаете утверждение, что внутренняя энергия есть функция состояния?
4. Какой термодинамический процесс называется круговым?
5. Чему равно изменение внутренней энергии системы в круговом процессе?
6. Изменение внутренней энергии системы при ее переходе из состояния 1 в 2 равно  $\Delta U_{12} = 150 \text{ Дж}$ , а при переходе из состояния 1 в 3 равно  $\Delta U_{13} = -60 \text{ Дж}$ . Чему равно изменение внутренней энергии системы при переходе из состояния 2 в состояние 3?
7. При переходе термодинамической системы из состояния 1 в состояние 2 ее внутренняя энергия изменяется на  $\Delta U_{12} = 700 \text{ Дж}$ , а при переходе из состояния 2 в состояние 3 на  $\Delta U_{23} = -180 \text{ Дж}$ . Чему равно изменение внутренней энергии системы при переходе из состояния 3 в состояние 1?
8. Определите изменение внутренней энергии 0,2 моль гелия, если его температура растёт от  $T_1 = 240 \text{ К}$  до  $T_2 = 320 \text{ К}$ .
9. Некоторая масса газа неона занимала объем  $V_1 = 3 \text{ л}$  при давлении  $p = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . В результате изобарного расширения внутренняя энергия этой массы газа увеличилась на  $\Delta U = 1,2 \text{ кДж}$ . Какой объем стал занимать неон?

Представим себе следующий опыт. Под поршнем с гирями, удерживаемом винтом, находится воздух при повышенном давлении (рис. 2.1, а). После освобождения поршня воздух расширяется и поршень поднимается вместе с грузом (рис. 2.1, б). Этот опыт показывает, что газ, расширяясь, совершает механическую работу за счет своей внутренней энергии. В результате увеличивается потенциальная энергия поршня вместе с гирями.

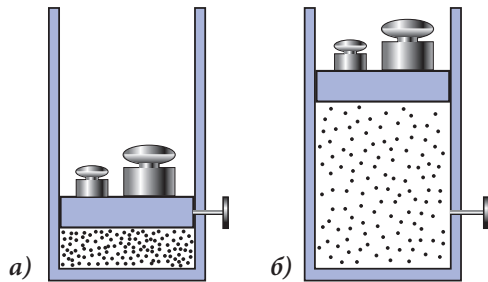


Рис. 2.1

Выведем формулу для работы, совершаемой газом при расширении, считая его очень медленным, чтобы процесс расширения был равновесным. На поршень действует сила давления  $F_p$ , равная произведению давления газа  $p$  и площади поршня  $S$ , то есть  $F_p = pS$ . При расширении давление изменяется, значит, изменяется и сила давления.

Допустим, что перемещение поршня  $\Delta h$  очень мало, так что изменением силы давления можно пренебречь. В этом случае работа называется **элементарной** и вычисляется как работа постоянной силы того же направления, что и перемещение (рис. 2.2). Работа газа  $\Delta A = F_p \cdot \Delta h = pS\Delta h$ . Как видно из рисунка, произведение  $S\Delta h = \Delta V$  это изменение объема газа. Выражение для элементарной работы силы давления примет вид:

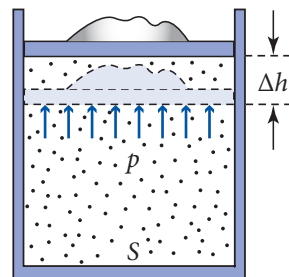


Рис. 2.2

$$\Delta A = p \cdot \Delta V. \quad (2.12)$$

Это выражение показывает, что при расширении ( $\Delta V > 0$ ) газ совершает положительную работу, то есть совершает работу над внешней средой (телами), а при сжатии ( $\Delta V < 0$ ) работа газа отрицательна, то есть внешняя среда совершает над ним работу. Между работой, совершаемой газом над внешними телами, и работой  $\Delta A'$ , совершаемой ими над газом, есть простая связь. Она является следствием третьего закона Ньютона. Согласно этому закону, сила давления  $\vec{F}_B$  газа на поршень и сила  $\vec{F}'$ , с которой поршень давит на газ, удовлетворяют условию  $\vec{F}' = -\vec{F}_B$ . Перемещения точек приложения этих сил одинаковы:  $\Delta h$ , следовательно, совершенные работы одинаковы по величине и противоположны по знаку:

$$\Delta A' = -\Delta A = -p\Delta V. \quad (2.13)$$

При сжатии, когда работа газа отрицательна, внешние силы совершают положительную работу ( $\Delta A' > 0$ ).

Из формулы (2.12) видно, что газ совершает работу, только если его объем изменяется ( $\Delta A \neq 0$ , если  $\Delta V \neq 0$ ). В изохорном процессе ( $V = \text{const}$ ,  $\Delta V = 0$ ) работа газа равна нулю.

Работа газа легко вычисляется в изобарном процессе, когда давление  $p$ , а значит, и сила давления  $F_p$  остаются постоянными. При изобарном расширении газа при давлении  $p$  от начального объема  $V_1$  до конечного  $V_2$  работа газа в соответствии с (2.12) равна:

$$A_p = p(V_2 - V_1). \quad (2.14)$$

Сравним формулу (2.14) с выражением  $A = F_s \cdot s$  для работы постоянной силы. Видна определенная аналогия. Формула из механики содержит произведение между проекцией силы и перемещению, равного разности координат, а формула (2.14) содержит произведение между давлением и изменением объема. Эта аналогия подсказывает идею использования графиков для вычисления работы газа. На осях вместо координаты и проекции силы надо взять объем и давление.

Пусть для начала давление газа остается постоянным (изобарный процесс). Построим соответствующий график (рис. 2.3, а). Видно, что работа газа (2.14) численно равна площади прямоугольника, сторонами которого являются: график изобары, часть абсциссы между  $V_1$  и  $V_2$  и отрезки прямых, соединяющие концы изобары с соответствующими точками на оси объемов.

Для вычисления работы газа при переменном давлении применим уже знакомый метод. Общее изменение объема ( $V_2 - V_1$ ) поделим на большое число маленьких участков  $\Delta V_i$  так, чтобы при изменении  $\Delta V_i$  давление  $p_i$  оставалось практически неизменным. Работа, совершенная газом при таком изменении объема, как видно из рисунка 2.3, б, численно равна площади узкой полоски шириной  $\Delta V_i$  и высотой  $p_i$ . Полная работа получится сложением элементарных работ. Сложив площади всех узких полосок, получим площадь под графиком. Следовательно, в случае переменного давления работа газа находится графическим методом. Как и в случае постоянного давления, она будет численно равна площади фигуры под графиком.

Графическая интерпретация работы газа позволяет установить важное ее свойство. Допустим, что газ переходит из начального состояния 1 в конечное состояние 2 двумя различными путями – один раз по пути 1a2, а второй раз по пути 1b2 (рис. 2.4). Как видно из рисунка, площади под графиками (фигуры 1a2V<sub>2</sub>V<sub>1</sub> и 1b2V<sub>2</sub>V<sub>1</sub>) различны. Значит, и совершенная газом работа в этих двух процессах различна, именно:  $A_{1a2} > A_{1b2}$ .

Следовательно, работа, совершенная газом при переходе из одного состояния в другое, зависит не только от этих состояний, но и от процесса (пути), которым газ из начального состояния перешел в конечное. Величины, обладающие этим свойством, называются функциями процесса. Итак, **величина работы газа при изменении объема есть функция процесса (зависит от процесса).**

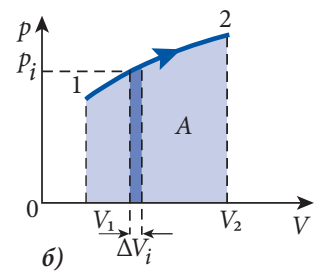
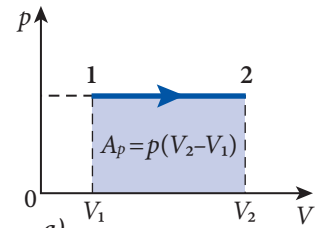


Рис. 2.3

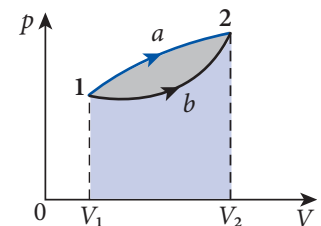


Рис. 2.4

Подсчитаем работу газа в круговом процессе (рис. 2.5). Допустим, что точка, представляющая состояние газа, проходит график кругового процесса в направлении часовой стрелки (рис. 2.5, а). Пусть состояние *a* соответствует минимальному объему, а состояние *c* – максимальному объему, занимаемому газом в этом процессе.

Работа газа в круговом процессе равна сумме работ в отдельных частях:  $A_{\text{цикл}} = A_{abc} + A_{cda}$ . В соответствии с графической интерпретацией работа  $A_{abc}$  численно равна площади фигуры  $abcV_{\text{max}}V_{\text{min}}$ , взятой со знаком плюс, а работа  $A_{cda}$  численно равна площади фигуры  $cdaV_{\text{min}}V_{\text{max}}$ , взятой со знаком минус (в процессе  $abc$  газ расширяется, его работа положительна, а в процессе  $cda$  газ сжимается, его работа отрицательна). Сложив алгебраически эти две площади, получим площадь фигуры, ограниченной графиком цикла (кругового процесса), взятого со знаком плюс. Итак, **работа газа в круговом процессе отличается от нуля.**

Этот результат – следствие того, что работа газа есть функция процесса.

Если цикл осуществляется в обратном направлении (в тригонометрическом), то кривая  $efg$ , представляющая расширение (рис. 2.5, б), будет под кривой  $ghe$ , представляющей сжатие. Сложив алгебраически площади под этими кривыми с соответствующими знаками, получим площадь фигуры, ограниченной графиком, взятую со знаком минус. Работа газа в этом круговом процессе отрицательна.

Так как работа газа в круговом процессе отлична от нуля, то это позволяет тепловым двигателям совершать механическую работу за счет внутренней энергии тел.

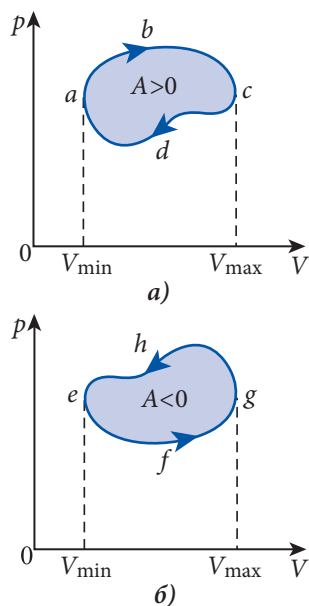


Рис. 2.5

### Пример решения задачи

#### Дано:

$\nu = 5$  моль,  
 $T_1 = 320$  К,  
 $T_3 = 500$  К

$A = ?$

5 моль идеального газа совершают цикл, состоящий из двух изобар и двух изохор (рис. 2.6). Вычислите работу, совершенную газом, если известно, что состояния 2 и 4 находятся на одной изотерме, а температуры состояний 1 и 3 равны 320 К и 500 К, соответственно.

#### Решение

Работа газа в рассматриваемом цикле численно равна площади прямоугольника на рисунке 2.6:

$$A = (p_2 - p_1) (V_4 - V_1).$$

Для определения изменений давления  $p_2 - p_1$  и объема  $V_4 - V_1$ , используем законы изохорного процесса  $1 \rightarrow 2$  и изобарного  $4 \rightarrow 1$ , соответственно:

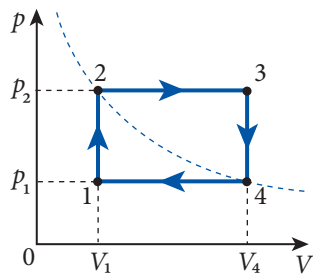


Рис. 2.6

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ или } p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1, \text{ откуда } p_2 - p_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1} p_1;$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_4}{T_4} \text{ или } V_4 = \frac{T_4}{T_1} V_1 = \frac{T_2}{T_1} V_1, \text{ откуда } V_4 - V_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_1} V_1.$$

Было учтено, что состояния 2 и 4 находятся на одной изотерме, т.е.  $T_4 = T_2$ . Подставив соотношения для  $p_2 - p_1$  и  $V_4 - V_1$  в выражение для работы, получим:

$$A = \frac{(T_2 - T_1)^2}{T_1^2} p_1 V_1.$$

Используя уравнение состояния  $p_1 V_1 = \nu R T_1$ , запишем

$$A = \frac{\nu R}{T_1} (T_2 - T_1)^2.$$

Для определения температуры  $T_2$ , напомним уравнения изохор  $1 \rightarrow 2$  и  $3 \rightarrow 4$ , приняв во внимание, что  $p_3 = p_2$ ,  $p_4 = p_1$  и  $T_4 = T_2$ :

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ и } \frac{p_3}{T_3} = \frac{p_4}{T_4} \text{ или } \frac{p_2}{T_3} = \frac{p_1}{T_2}.$$

Умножая почленно уравнения этих изохор, получаем:

$$\frac{p_1 p_2}{T_1 T_3} = \frac{p_1 p_2}{T_2^2},$$

откуда

$$T_2 = \sqrt{T_1 T_3}.$$

Таким образом, окончательное выражение для работы газа за цикл принимает вид:

$$A = \frac{\nu R}{T_1} (\sqrt{T_1 T_3} - T_1)^2 = \nu R (T_3 - 2\sqrt{T_1 T_3} + T_1); A = 831 \text{ Дж}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Как можно вычислить работу газа, если известен график зависимости давления от объема?
2. В каком случае работа газа отрицательна?
3. Как понять выражение, что работа газа есть функция процесса?
4. Что вы можете сказать о работе газа в круговом процессе? Аргументируйте ответ.

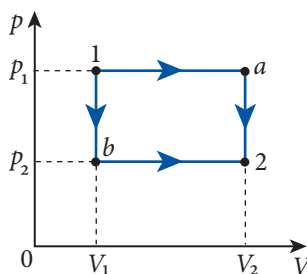


Рис. 2.7

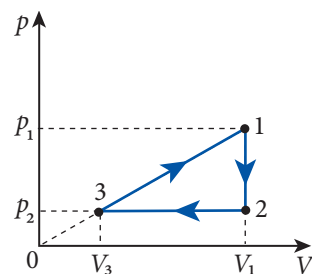


Рис. 2.8

5. Газ переходит двумя разными путями из состояния 1 с параметрами  $p_1 = 2 \cdot 10^5$  Па и  $V_1 = 0,1$  м<sup>3</sup> в состояние 2 с параметрами  $p_2 = 10^5$  Па и  $V_2 = 0,4$  м<sup>3</sup> (рис. 2.7). Вычислите работу, совершенную газом в этих двух процессах.
6. Газ объемом  $V_1 = 2$  м<sup>3</sup> при давлении  $p_1 = 4 \cdot 10^5$  Па совершает цикл, показанный на рисунке 2.8. Чему равна работа газа в этом цикле, если  $p_2 = 10^5$  Па?

Рассмотрим другой способ изменения внутренней энергии термодинамической системы. Допустим, что твердое тело  $A$  с температурой  $T$  опущено в сосуд с жидкостью с температурой  $T_B < T_A$  (рис. 2.9). Своей поверхностью твердое тело соприкасается с жидкостью. В результате теплового движения молекулы поверхности твердого тела соударяются с молекулами жидкости. Температура твердого тела выше, чем температура жидкости, и молекулы его имеют кинетическую энергию поступательного движения выше, чем молекулы жидкости. При соударениях молекулы твердого тела передают часть своей кинетической энергии молекулам жидкости. Таким образом, через поверхность твердого тела осуществляется переход части внутренней энергии тела к окружающей его жидкости.

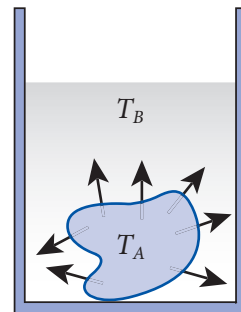


Рис. 2.9

Этот способ передачи внутренней энергии от одного тела к другому тоже в виде внутренней энергии называется **теплообменом**, а количество энергии, переданной теплообменом, называется **количеством теплоты**.

Теплообмен наблюдается в случае, когда у тел разные температуры. Одновременно с выравниванием температур становятся равными и средние кинетические энергии поступательного движения молекул, теплообмен прекращается. Система тел переходит в состояние теплового равновесия и температура в различных ее частях имеет одно и то же значение.

Итак, существует два способа изменения внутренней энергии системы: совершением механической работы и теплопередачей. В первом случае необходимо, чтобы объем системы изменялся, а во втором случае этого не требуется. Чтобы понять принципиальное отличие между этими двумя способами, обратимся к молекулярно-кинетической теории. Когда газ расширяется и совершает механическую работу (рис. 2.1), все частицы поршня и гирь движутся вместе в одном направлении, вертикально вверх, т.е. движутся упорядоченно. Следовательно, совершение механической работы за счет внутренней энергии характеризуется превращением энергии хаотического движения молекул газа в энергию упорядоченного движения молекул поршня, или, наоборот, в случае отрицательной работы. Но в случае теплообмена (рис. 2.9) энергия хаотического движения молекул одного тела (твердого тела  $A$ ) переходит в энергию движения, тоже хаотического, молекул жидкости, окружающей тело  $A$ . Налицо два существенно различных способа изменения внутренней энергии.

Количество теплоты обозначается через  $Q$ . Ее единица такая же, как и энергии, то есть 1 Дж<sup>1</sup>. Принято считать количество теплоты, полученное системой, положительным ( $Q_{\text{пол.}} > 0$ ), а отданное – отрицательным ( $Q_{\text{отд.}} < 0$ ).

<sup>1</sup> До сих пор в пищевой промышленности и технике применяется и старая единица количества теплоты – калория (от латинского *calor* – тепло, жар: 1 кал = 4,1855 Дж).

Рассмотрим круговой процесс. На одних его участках система, над которой совершается процесс, получает какое-то количество теплоты, на других – отдает. Обозначим через  $Q_{\text{пол.}}$  сумму всех полученных количеств теплоты и через  $Q_{\text{отд.}}$  сумму всех отданных количеств теплоты во время кругового процесса. Тогда  $Q_{\text{цикл.}} = Q_{\text{пол.}} + Q_{\text{отд.}}$ . Введем абсолютные величины:  $|Q_{\text{пол.}}| = Q_1$  и  $|Q_{\text{отд.}}| = Q_2$ . Помня принятое правило знаков, имеем:  $Q_{\text{пол.}} = Q_1$  и  $Q_{\text{отд.}} = -Q_2$ .

Для количества теплоты, которым система осуществляет обмен с окружающей средой на протяжении одного цикла, имеем:

$$Q_{\text{цикл.}} = Q_{\text{пол.}} + Q_{\text{отд.}} = Q_1 - Q_2. \quad (2.15)$$

Из VIII класса вам известно о связи между переданным количеством теплоты однородному телу и изменением его температуры:

$$Q = mc(t_2 - t_1). \quad (2.16)$$

Здесь  $c$  – **удельная теплоемкость** вещества, из которого состоит тело массой  $m$ , а  $(t_2 - t_1)$  – изменение температуры тела. Но  $(t_2 - t_1) = (T_2 - T_1) = \Delta T$ , поскольку изменение температуры в градусах Цельсия или в кельвинах одинаково. Тогда:

$$Q = mc\Delta T, \quad (2.17)$$

откуда

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \quad (2.18)$$

следовательно:

Удельная теплоемкость вещества равна отношению количества теплоты, полученного или отданного телом из этого вещества, к произведению массы тела на изменение его температуры.

Единица удельной теплоемкости:  $[c] = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

При вычислении количества теплоты, переданного газу, удобнее применять **молярную теплоемкость**, которая находится из соотношения:

$$C_M = \frac{Q}{\nu \cdot \Delta T}, \quad (2.19)$$

то есть:

Молярная теплоемкость вещества равна отношению полученного или отданного телом из этого вещества количества теплоты к произведению количества вещества на изменение температуры тела.

Единица молярной теплоемкости:  $[C_M] = \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

Количество теплоты:

$$Q = \nu C_M \Delta T = \frac{m}{M} C_M \Delta T. \quad (2.20)$$

Между молярной теплоемкостью и удельной теплоемкостью существует простая связь, которая следует из сравнения формул (2.17) и (2.20) или (2.18) и (2.19):

$$C_M = cM. \quad (2.21)$$

Иногда используется так называемая **теплоемкость тела**:

$$C = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (2.22)$$



равная отношению количества теплоты, полученного или отданного телом, к изменению его температуры. Единица теплоемкости  $[C] = \text{Дж/К}$ , а количество теплоты определяется из выражения:

$$Q = C\Delta T. \quad (2.23)$$

Сравнивая выражение (2.23) с (2.17) и (2.20), для однородного тела получим:

$$C = mc = \nu C_M. \quad (2.24)$$

Величины  $c$ ,  $C_M$  и  $C$  называются **калорическими коэффициентами**. Для удельной и молярной теплоемкости можно сформулировать и другие определения:

**Удельная теплоемкость численно равна теплоемкости 1 кг вещества, а молярная теплоемкость численно равна теплоемкости одного моля вещества.**

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Опишите механизм теплообмена при контакте двух тел.
2. При каком условии у двух тел, находящихся в контакте, осуществляется теплообмен?
3. В чем принципиальное отличие двух способов изменения внутренней энергии: совершением работы и теплообменом?
4. В каком случае количество теплоты отрицательно? В каком – положительно?
5. Дайте определение молярной теплоемкости вещества. Какая связь между молярной и удельной теплоемкостями?
6. Алюминиевому телу массой 1,5 кг передали 68,7 кДж теплоты. До какой температуры оно нагреется, если начальная температура была равной  $23^\circ\text{C}$ ? Удельная теплоемкость алюминия  $c = 916 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ .
7. Чему равна теплоемкость системы, состоящей из двух однородных тел массами  $m_1$  и  $m_2$ , удельные теплоемкости которых соответственно равны  $c_1$  и  $c_2$ ?

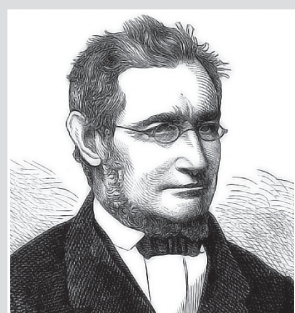
## 2.4 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К РАЗЛИЧНЫМ ПРОЦЕССАМ

### а. Первый закон термодинамики

Из механики нам известно, что механическая энергия изолированной системы остается постоянной, если в ней не действуют неконсервативные силы – трения или сопротивления со стороны среды. Если же в системе действуют неконсервативные силы, то ее механическая энергия со временем уменьшается. С другой стороны, известно, что в результате трения тела нагреваются. Таким путем еще в древности люди добывали



Рис. 2.10



Наблюдения над цветом крови матросов, различной в тропиках и северных широтах, подсказали Майеру идею о существовании связи между теплотой и механической работой. Им проведены соответствующие исследования в области физики. Определен механический эквивалент теплоты – связь между единицами измерения работы и тепла, которые были различными в то время. Установлена связь между молярными теплоемкостями газов при постоянном давлении и объеме (*уравнение Майера*). Сформулирован закон сохранения и превращения энергии.

огонь (рис. 2.10). Да и в наши дни, зимой, чтобы согреться, мы трем замерзшие руки одна о другую. Эти и многие другие похожие явления показывают, что при трении механическая работа способствует росту внутренней энергии тел, находящихся в контакте. Иначе говоря, уменьшение механической энергии тел, составляющих замкнутую систему и взаимодействующих неконсервативными силами, сопровождается ростом внутренней энергии тел системы.

Закономерности, позволившие описать количественно превращения такого типа, были установлены в сороковых годах XIX века в работах Р. Майера, Д. Джоуля, Г. Гельмгольца. На их основе был сформулирован закон сохранения энергии, включающий в себя и тепловые явления, известный под названием **первого закона термодинамики**.

В соответствии с этим законом внутренняя энергия системы тел может изменяться только при обмене энергией с внешними телами. Этот обмен энергией можно осуществить двумя путями: теплообменом и совершением механической работы. Итак:

**Изменение внутренней энергии макроскопической системы равно сумме количества теплоты, полученного системой, и совершенной механической работы над ней телами, окружающими систему,**

то есть:

$$\Delta U = Q + A' . \quad (2.25)$$

Так как на практике чаще решают проблему совершения механической работы за счет внутренней энергии (в любом тепловом двигателе), изменим выражение (2.25), перейдя в нем к работе  $A$ , совершенной самой системой. Приняв во внимание (2.13), то есть  $A' = -A$ , перейдем в выражении (2.25) к работе газа:  $\Delta U = Q - A$  или

$$Q = \Delta U + A . \quad (2.26)$$

**Количество теплоты, полученное системой, равно сумме изменения внутренней энергии системы и совершенной ею механической работы над внешними телами.**

Выражение (2.25) или (2.26) и соответствующие формулировки называются **первым законом термодинамики**. Это всеобщий закон природы, применяемый к любой системе тел в любом агрегатном состоянии.

Изменение внутренней энергии системы не зависит от процесса перехода системы из одного состояния в другое, а работа газа зависит от этого процесса. Количество

теплоты, как сумма этих величин, зависит от процесса перехода между состояниями, то есть **количество теплоты есть функция процесса**, как и работа газа.

Применим этот закон к системе, совершающей круговой процесс. Закон (2.26) перепишем в виде:  $Q_{\text{цикл.}} = \Delta U_{\text{цикл.}} + A_{\text{цикл.}}$ . Выше было установлено, что изменение внутренней энергии при круговом процессе (2.5) равно нулю, а количество теплоты в этом процессе (2.15) находится из выражения:  $Q_{\text{цикл.}} = Q_1 - Q_2$ . Тогда механическая работа:

$$A_{\text{цикл.}} = Q_1 - Q_2, \tag{2.27}$$

то есть работа системы при круговом процессе равна разности между полученным извне количеством теплоты и абсолютной величиной отданного за цикл количества теплоты во внешнюю среду.

**б. Применение первого закона термодинамики к простым процессам идеального газа**

Проанализируем простые процессы идеального газа с точки зрения происходящих при этом превращений энергии. С этой целью сведем вместе все необходимые выражения:

*первый закон термодинамики*  $Q = \Delta U + A;$  (2.26)

*количество теплоты*  $Q = \nu C_M \Delta T;$  (2.20)

*изменение внутренней энергии*  $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T;$  (2.11)

*работа газа*  $A = p \Delta V;$  (2.12)

*термическое уравнение состояния*  $pV = \nu RT.$  (2.28)

**Изохорный процесс** ( $V = \text{const}, \Delta V = 0$ ). Из (2.12) следует, что работа газа в этом процессе равна нулю. Из (2.26) имеем:

$$Q_V = \Delta U_V. \tag{2.29}$$

Индекс физической величины (в нашем случае  $V$ ) означает параметр, неизменный при соответствующем процессе.

Итак, **в изохорном процессе количество теплоты, переданное системе, равно изменению ее внутренней энергии.**

Подставим выражения (2.20) и (2.11) в (2.29):

$$\nu C_{MV} \Delta T = \frac{3}{2} \nu R \Delta T.$$

Отсюда молярная теплоемкость при постоянном объеме

$$C_{MV} = \frac{3}{2} R. \tag{2.30}$$

Это выражение показывает, что у **всех идеальных одноатомных газов при постоянном объеме одинаковы молярные теплоемкости**. Полученный результат остается верным и для всех идеальных двухатомных газов, у которых, однако, другая величина молярной теплоемкости при постоянном объеме. Соответственно идеальные газы, состоящие из трехатомных или многоатомных молекул, имеют другие, равные между собой, значения молярной теплоемкости при постоянном объеме.

Здесь видно удобство применения молярных теплоемкостей – они не зависят от природы газа, а только от числа атомов в его молекулах.

Используя выражение (2.30), отношение (2.11) преобразуем в

$$\Delta U = \nu C_{M\Gamma} \Delta T. \quad (2.31)$$

**Изотермический процесс** ( $T = \text{const}$ ,  $\Delta T = 0$ ). Из (2.11) или (2.31) видно, что внутренняя энергия в этом процессе остается постоянной. Из (2.26) получим:

$$Q_T = A_T. \quad (2.32)$$

**В изотермическом процессе полученное идеальным газом количество теплоты равно совершенной газом работе.**

Эта формулировка соответствует изотермическому расширению. В случае изотермического сжатия преобразование энергии происходит в обратном направлении – работа, совершенная внешними силами, равна по абсолютной величине отданному количеству теплоты.

Графиком изотермы в координатах  $p$ ,  $V$  является гипербола, а работа газа численно равна площади под ним (рис. 2.11) и может быть найдена приближительным вычислением этой площади. Для вывода формулы работы необходимо применить методы высшей математики, которые вы изучите позже.

**Изобарный процесс** ( $p = \text{const}$ ,  $\Delta p = 0$ ). Все члены выражения (2.26) отличны от нуля, то есть количество теплоты, полученное идеальным газом, частично идет на увеличение его внутренней энергии, остаток используется для совершения механической работы (рис. 2.12).

Работа газа в изобарном процессе дана в (2.14):  $A_p = p(V_2 - V_1)$ . Согласно термическому уравнению состояния идеального газа  $pV_1 = \nu RT_1$  и  $pV_2 = \nu RT_2$ , работа газа примет вид:

$$A_p = \nu R(T_2 - T_1) = \nu R \Delta T. \quad (2.33)$$

Это выражение позволяет установить физический смысл универсальной газовой постоянной  $R$ . Из (2.33) следует, что для  $\nu = 1$  моль и  $\Delta T = 1$  К работа  $A_p$  численно равна  $R$ . Следовательно,

**универсальная газовая постоянная  $R$  численно равна работе, совершаемой 1 молем идеального газа при изобарном нагреве его на 1 К.**

Подставим выражения (2.20), (2.31) и (2.33) в формулу (2.26). Получим:

$$\nu C_{Mp} \Delta T = \nu C_{M\Gamma} \Delta T + \nu R \Delta T,$$

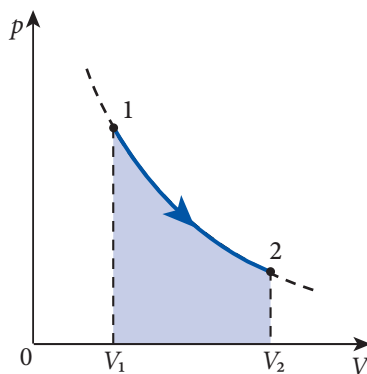


Рис. 2.11

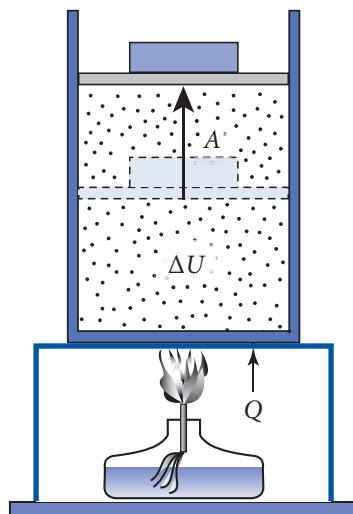


Рис. 2.12

откуда следует:

$$C_{Mp} = C_{MV} + R. \quad (2.34)$$

Это соотношение между молярными теплоемкостями идеального газа при постоянном давлении  $C_{Mp}$  и постоянном объеме  $C_{MV}$  называется **уравнением Майера**.

Для любого идеального газа независимо от числа атомов в молекуле молярная теплоемкость при постоянном давлении больше молярной теплоемкости при постоянном объеме на одну и ту же величину  $R$ . Это уравнение справедливо не только для одноатомного, но и для любого идеального газа с любым числом атомов в молекулах.

Заметим, что  $C_{Mp} > C_{MV}$ , так как при изохорном нагреве все полученное количество теплоты идет на увеличение внутренней энергии, а при изобарном нагреве одна часть полученного количества теплоты расходуется на совершение механической работы, другая часть – на увеличение внутренней энергии, значит, и температуры  $T$ .

Связь между молярной теплоемкостью  $C_M$  и удельной дается формулой (2.21):  $C_M = cM$ . Переходя в (2.34) к удельным теплоемкостям, получим уравнение Майера в следующем виде:

$$c_p = c_v + \frac{R}{M}. \quad (2.34, a)$$

**Адиабатный процесс\*** ( $Q = 0$ ). Это процесс без теплообмена с внешней средой – система не получает и не отдает тепло. Теплообмен не совершается, если система помещена в **теплоизолирующую оболочку**, называемую **адиабатной оболочкой**. На практике считаются адиабатными процессы, протекающие за очень короткие промежутки времени, в течение которых система не успевает обменяться теплом с окружающей средой. Для адиабатного процесса из (2.26) следует:

$$A_{ад.} = -\Delta U, \quad (2.35)$$

то есть работа газа в адиабатном процессе совершается за счет его внутренней энергии.

Учитывая выражения (2.12) и (2.31), перепишем последнее соотношение в виде:

$$p \Delta V = -\nu C_{MV} \Delta T. \quad (2.36)$$

Изменение объема  $\Delta V$  и изменение температуры  $\Delta T$  имеют противоположные знаки. То есть при адиабатном расширении ( $\Delta V > 0$ ) газ охлаждается ( $\Delta T < 0$ ) и, наоборот, при адиабатном сжатии газ нагревается. Убедимся в этом на простых опытах. Толстостенный стеклянный сосуд или пластиковую бутылку закроем пробкой, через которую проходит трубка, соединенная с воздушным насосом (рис. 2.13). Если воздух в сосуде сухой, введем несколько капель воды, затем закупорим так, чтобы пробка могла легко вылететь. По мере накачивания воздуха давление в бутылке будет расти, и в какой-то момент пробка вылетит. В бутылке образуется туман, что говорит о том, что при адиабатном расширении воздуха его температура опускается ниже точки росы.

Другой опыт. В цилиндре из прозрачного органического стекла имеется канал, по которому может перемещаться поршень, соединенный штоком с рукояткой (рис. 2.14). На дно канала карандашом или палочкой протолкнем кусочек сухой

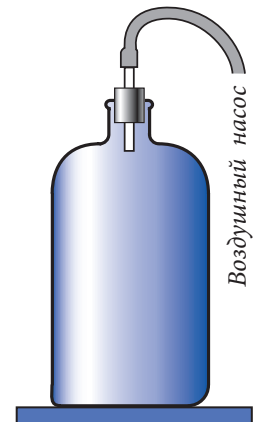


Рис. 2.13

ваты, соскоблим горючее вещество с одной–двух головок спичек и насыпем сверху на вату. Установим поршень в верхней части канала, а затем резко, почти ударом, нажмем ладонью на рукоятку и втолкнем поршень в канал. Воздух резко сожмется и мы увидим вспышку, означающую, что при адиабатном сжатии его температура возросла и достигла значения температуры воспламенения веществ в канале (140–200 °С).

Изменение температуры идеального газа в адиабатном процессе можно объяснить с помощью молекулярно-кинетической теории. Будем считать абсолютно упругими соударения молекул с массивным поршнем, движущимся со скоростью  $\vec{u}$ . Предположим для простоты, что скорость молекулы до соударения  $\vec{v}_0$ , как и ее скорость  $\vec{v}$  после соударения, перпендикулярны поверхности поршня (рис. 2.15).

Из механики известно, что при абсолютно упругом соударении шарика, летящего перпендикулярно поверхности неподвижной стенки, масса которой во много раз больше массы шарика, его скорость меняет направление на обратное, оставаясь той же по модулю.

Применим этот результат к абсолютно упругому соударению молекулы с подвижным поршнем. В системе отсчета, связанной с поршнем, скорость молекулы (относительная скорость) до соударения равна  $(\vec{v}_0 - \vec{u})$ , а после соударения  $(\vec{v} - \vec{u})$ . Эти две относительные скорости равны по модулю и противоположно направлены, то есть  $(\vec{v} - \vec{u}) = -(\vec{v}_0 - \vec{u})$ . Отсюда выразим скорость молекулы после соударения в системе отсчета, связанной с цилиндром, в котором движется поршень:  $\vec{v} = -\vec{v}_0 + 2\vec{u}$ .

Для проекции на ось  $x$  скорости  $\vec{v}$  в случае удаляющегося поршня (рис. 2.15, а) имеем  $v_a = v_0 - 2u$ , а когда поршень движется навстречу молекуле (рис. 2.15, б), будет  $v_b = v_0 + 2u$ .

Итак, при абсолютно упругом соударении молекулы с удаляющимся от нее поршнем (при расширении газа) скорость молекулы уменьшается,  $v_a < v_0$ , а при соударении с приближающимся (сжатие газа) увеличивается,  $v_b > v_0$ . Этот результат верен и в случае косоугого удара молекул, когда проекции скорости, параллельные поверхности поршня, не изменяются, а перпендикулярные изменяются, как и в рассмотренном выше примере.

Это уменьшение скоростей молекул при адиабатном расширении идеального газа и их увеличение при адиабатном сжатии сопровождается соответствующим изменением кинетической энергии молекул, а значит и внутренней энергии идеального газа и, соответственно, его температуры.

Отметим, что в случае изотермического расширения или сжатия соответствующие изменения внутренней энергии идеального газа компенсируются полученным извне количеством теплоты или отданным внешней среде так, что внутренняя энергия, а, значит, и температура остаются неизменными.

График адиабатного процесса называется **адиабатой**. Построим адиабату в координатах  $p, V$ . Для сравнения построим сначала изотерму. Из термического уравнения состояния

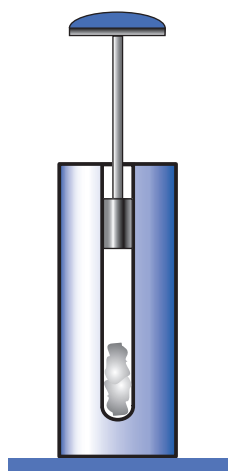


Рис. 2.14

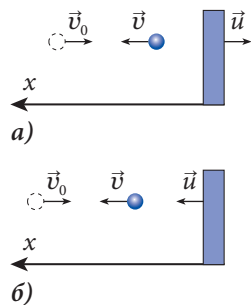


Рис. 2.15

$$(2.28) \text{ давление газа } p = \frac{\nu RT}{V}.$$

При изотермическом расширении давление газа уменьшается только благодаря росту объема. При адиабатном расширении давление уменьшается как за счет роста объема, так и за счет уменьшения температуры газа.

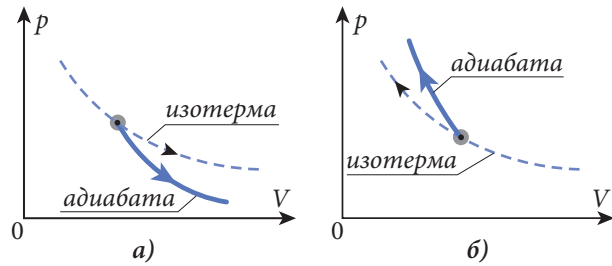


Рис. 2.16

Итак, при адиабатном расширении давление газа уменьшается быстрее, чем при изотермическом расширении, и адиабата находится под изотермой (рис. 2.16, а). При адиабатном сжатии давление газа растет быстрее, чем при изотермическом, адиабата находится выше изотермы (рис. 2.16, б).

Как известно, зависимость давления газа от объема в изотермическом процессе дается законом Бойля–Мариотта (1.18),  $pV = \text{const}$ . Подобное соотношение для зависимости давления газа от объема в адиабатном процессе было установлено французским математиком и физиком Денисом Симеоном Пуассоном (1781–1840). Исходя из выражения (2.36) и используя уравнение Клапейрона–Менделеева, он получил формулу:

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (2.37)$$

известное как **уравнение Пуассона**. В этом уравнении экспонента объема называется **показателем адиабаты**:

$$\gamma = \frac{C_{Mp}}{C_{Mv}}. \quad (2.38)$$

Из формулы Майера (2.34) следует, что  $C_{Mp} > C_{Mv}$ , то есть  $\gamma > 1$ . Поэтому величина  $V^\gamma$  изменяется быстрее, чем объем  $V$ . Следовательно, и давление газа в адиабатном процессе (2.37) изменяется быстрее, чем в изотермическом, что было установлено ранее другим способом.

### Пример решения задачи

1

<b>Дано:</b>	СИ:
$p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па},$	
$V_1 = 10 \text{ л},$	$10^{-2} \text{ м}^3$
$p_2 = 2p_1 (V_1 = \text{const}),$	
$V_3 = 4V_2 (p_2 = \text{const})$	
$Q - ?$	Дж

Одноатомный идеальный газ первоначально находится в состоянии с параметрами  $p_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и  $V_1 = 10 \text{ л}$ . При сообщении газу некоторого количества теплоты он вначале удваивает свое давление при постоянном объеме, а затем расширяется при постоянном давлении до объема, в 4 раза превышающего первоначальный. Представьте этот процесс в координатах  $p, V$  и вычислите количество теплоты, сообщенное газу.

### Решение

Рассматриваемый в задаче процесс состоит из одной изохоры и одной изобары, он представлен на рисунке 2.17.

Количество теплоты, сообщаемое газу, состоит из количества теплоты, сообщаемого при переходе из состояния 1 в состояние 2 –  $Q_{12}$  и из состояния 2 в состояние 3 –  $Q_{23}$ :

$$Q = Q_{12} + Q_{23}.$$

Переход 1 → 2 – это изохора и в соответствии с (2.29) – (2.31)

$$Q_{12} = \Delta U = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1).$$

Для определения температуры газа в состоянии 2 используем закон для изохорного процесса:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ или } \frac{T_2}{T_1} = \frac{2p_1}{p_1} = 2, \text{ откуда } T_2 = 2T_1.$$

Записав уравнение состояния газа  $p_1 V_1 = \nu R T_1$ , для  $Q_{12}$  получим:

$$Q_{12} = \frac{3}{2} \nu R (2T_1 - T_1) = \frac{3}{2} \nu R T_1 = \frac{3}{2} p_1 V_1.$$

Переход 2 → 3 – это изобара и согласно первому закону термодинамики

$$Q_{23} = \Delta U_{23} + A_{23},$$

где  $A_{23} = p_2 (V_3 - V_2) = 2p_1 (4V_1 - V_1) = 6p_1 V_1$  – это работа, совершенная газом в изобарном процессе 2 → 3, а  $\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2)$  – изменение внутренней энергии в этом процессе. Для определения температуры  $T_3$ , используем закон для изобарного процесса:

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_2}{T_2} \text{ или } \frac{T_3}{2T_1} = \frac{4V_1}{V_1}, \text{ откуда } T_3 = 8T_1.$$

Таким образом,  $\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R \cdot (8T_1 - 2T_1) = 9\nu R T_1 = 9p_1 V_1$ , а  $Q_{23} = 9p_1 V_1 + 6p_1 V_1 = 15p_1 V_1$ .

Таким образом, количество теплоты, сообщенное газу в процессе 1 → 2 → 3, равно:

$$Q = 1,5p_1 V_1 + 15p_1 V_1 = 16,5p_1 V_1; Q = 66 \text{ кДж}.$$

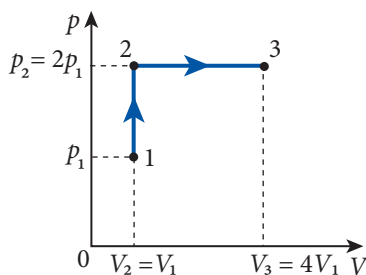


Рис. 2.17

## Пример решения задачи

### 2

#### Дано:

$V_1 = 1 \text{ л},$   
 $T_1 = 300 \text{ К},$   
 $m = 20 \text{ кг},$   
 $S = 100 \text{ см}^2,$   
 $Q = 90 \text{ Дж},$   
 $\Delta T = 100 \text{ К},$   
 $p_0 = 10^5 \text{ Па},$   
 $g \approx 10 \text{ м/с}^2$

$\Delta U - ?$

#### СИ:

$10^{-3} \text{ м}^3$

$10^{-2} \text{ м}^2$

Дж

В вертикальном цилиндре, снабженном поршнем, находится идеальный газ объемом  $V_1 = 1 \text{ л}$  при температуре  $T_1 = 300 \text{ К}$ . Масса поршня равна  $20 \text{ кг}$ , а площадь поверхности  $S = 100 \text{ см}^2$ . После сообщения газу количества теплоты  $90 \text{ Дж}$  его температура увеличилась на  $100 \text{ К}$ . Пренебрегая силой трения о стенки цилиндра, найдите изменение внутренней энергии газа. Атмосферное давление считать нормальным, то есть  $p_0 = 10^5 \text{ Па}$ , а ускорение свободного падения  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

## Решение

Замечаем, что силы давления атмосферы и поршня постоянны и давление, оказываемое на газ, также постоянно. Следовательно, процесс нагревания и расширения газа



происходит при постоянном давлении. Таким образом, согласно первому закону термодинамики,

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

В соответствии с (2.12) работа, совершаемая газом, равна

$$A = p(V_2 - V_1),$$

где  $p = p_0 + \frac{mg}{S}$  – это давление газа, равное сумме атмосферного давления и создаваемого поршнем, а изменение объема может быть определено с помощью закона для изобарного процесса. В самом деле,

$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ , где  $T_2 = T_1 + \Delta T$  – это конечная температура. Следовательно,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_1 + \Delta T}{T_1} = 1 + \frac{\Delta T}{T_1} \text{ или } V_2 = V_1 \left( 1 + \frac{\Delta T}{T_1} \right).$$

Таким образом, для изменения внутренней энергии газа получаем:

$$\Delta U = Q - p(V_2 - V_1) = Q - \left( p_0 + \frac{mg}{S} \right) \left( \chi + \frac{\Delta T}{T_1} - \chi \right) V_1 = Q - \left( p_0 + \frac{mg}{S} \right) \frac{V_1}{T_1} \Delta T;$$

$$\Delta U = 50 \text{ Дж.}$$

### Пример решения задачи

3

#### Дано:

- $\nu = 0,1$  моль,
- $V_1 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,
- $p_1 = 16,62 \cdot 10^4 \text{ Па}$ ,
- $V_2/V_1 = 2$ ,
- $T_1 = T_3$

- $\Delta U_{12} - ?$ ,  $A_{12} - ?$ ,  $Q_{12} - ?$ ;
- $\Delta U_{23} - ?$ ,  $A_{23} - ?$ ,  $Q_{23} - ?$ ;
- $\Delta U_{123} - ?$ ,  $A_{123} - ?$ ,  $Q_{123} - ?$

Идеальный одноатомный газ в количестве  $\nu = 0,1$  моль занимает объем  $V_1 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$  при давлении  $p_1 = 16,62 \cdot 10^4 \text{ Па}$ . Вследствие изобарного расширения объем газа возрос в 2 раза, затем, после адиабатного расширения, температура газа снизилась до начальной температуры. Определите изменение внутренней энергии, работу, совершенную газом, и количество теплоты, полученное им при изобарном процессе, адиабатном процессе и при процессе, состоящем из этих обоих этапов.

#### Решение

Представим описанные в задаче процессы на диаграмме ( $p, V$ ). Температура  $T_3$  равна  $T_1$ , значит состояния 1 и 3 находятся на одной изотерме (рис. 2.18). Вычислим параметры состояния газа. Из термического уравнения состояния

$pV = \nu RT$  выразим температуру  $T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R}$ ;  $T_1 = 300 \text{ К}$ . Процесс 1–2 изобарный и, согласно закону Гей-Люссака,

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

$$\text{или } T_2 = \frac{V_2}{V_1} T_1 = 2T_1 = 600 \text{ К.}$$

Изменение внутренней энергии в процессе 1–2 равно  $\Delta U_{12} = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1)$ ;  $\Delta U_{12} = 374 \text{ Дж}$ . Работа газа  $A_{12} = p_1 (V_2 - V_1)$ ;  $A_{12} = 249 \text{ Дж}$ . Полученное количество теплоты в

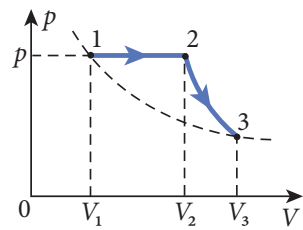


Рис. 2.18

изобарном процессе  $Q_{12} = \nu C_{Mp}(T_2 - T_1)$ . Согласно уравнению Майера,  $C_{Mp} = C_{Mv} + R$ . Молярная теплоемкость при постоянном объеме идеального одноатомного газа  $C_{Mv} = \frac{3}{2}R$ , значит  $C_{Mp} = \frac{5}{2}R$ .

Имеем  $Q_{12} = \frac{5}{2}\nu R(T_2 - T_1)$ ;  $Q_{12} = 623$  Дж. Все три величины, фигурирующие в первом законе термодинамики, были вычислены независимым образом. Проверим правильность вычислений, определив количество теплоты  $Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12}$ ;  $Q_{12} = 374$  Дж +  $249$  Дж =  $623$  Дж, то есть результат совпадает с найденным выше.

Изменение внутренней энергии в адиабатном процессе 2–3 равно  $\Delta U_{23} = \frac{3}{2}\nu R(T_3 - T_2) = \frac{3}{2}\nu R(T_1 - T_2)$ ;  $\Delta U_{23} = 374$  Дж.

Работа газа в адиабатном процессе  $A_{23} = -\Delta U_{23} = 374$  Дж.

Полученное количество теплоты  $Q_{23} = 0$ , в соответствии с определением адиабатного процесса.

Вычислим величины, относящиеся ко всему процессу 1–2–3. Изменение внутренней энергии  $\Delta U_{123} = \Delta U_{12} + \Delta U_{23} = 0$ . Этот результат можно получить напрямую, учитывая тот факт, что внутренняя энергия есть функция состояния:  $\Delta U_{123} = \frac{3}{2}\nu R(T_3 - T_1) = 0$ , так как  $T_3 = T_1$ .

Работа газа  $A_{123} = A_{12} + A_{23} = 623$  Дж, а полученное количество теплоты  $Q_{123} = Q_{12} + Q_{23} = 623$  Дж. Этот результат был ожидаем, так как изменение внутренней энергии равно нулю.

### Пример решения задачи

4

#### Дано:

$\nu = 6$  молей,

$T = aV^2$ ,

$T_1 = 300$  К,

$T_2 = 600$  К

$A - ?$   $Q - ?$

При нагревании 6 молей идеального одноатомного газа от 300 К до 600 К его температура растет пропорционально квадрату объема. Найдите работу, совершенную в данном случае, и количество теплоты, сообщенное газу.

### Решение

Поскольку температура газа не прямо пропорциональна его объему, то процесс не является изобарным, а значит, при нагревании газа его давление также изменяется. Поэтому следует использовать уравнение Клапейрона (1.28):

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

где, согласно условию задачи, первоначальная и конечная температуры равны  $T_1 = aV_1^2$  и  $T_2 = aV_2^2$ , соответственно. Таким образом,

$$\frac{p_1 V_1}{aV_1^2} = \frac{p_2 V_2}{aV_2^2} \text{ или } \frac{p_1}{V_1} = \frac{p_2}{V_2}, \text{ то есть } p_1 V_2 = p_2 V_1.$$

Из этого следует, что в рассматриваемом процессе давление прямо пропорционально объему. В координатах  $p, V$  процесс представлен на рисунке 2.19. Поскольку работа, совершенная при изменении объема газа, равна площади фигуры под графиком процесса, то есть площади трапеции с основаниями  $p_1$  и  $p_2$ , и высотой  $V_2 - V_1$ , получаем:

$$A = \frac{1}{2}(p_1 + p_2)(V_2 - V_1) = \frac{1}{2}(p_1 V_2 + p_2 V_2 - p_1 V_1 - p_2 V_1).$$

Используя результат, полученный выше, а именно  $p_1 V_2 = p_2 V_1$ , для работы получим выражение

$$A = \frac{1}{2} \nu R (T_2 - T_1); A \approx 7,5 \text{ кДж.}$$

Согласно первому закону термодинамики количество теплоты, сообщенное газу  $Q = \Delta U + A$ . Поскольку газ одноатомный, то  $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1)$ . Таким образом, количество теплоты, сообщенное газу, равно:

$$Q = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1) + \frac{1}{2} \nu R (T_2 - T_1) = 2 \nu R (T_2 - T_1); Q \approx 30 \text{ кДж.}$$

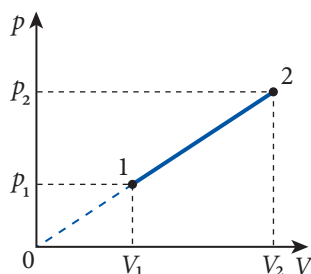


Рис. 2.19

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. В каком из простых процессов количество теплоты, полученное идеальным газом, полностью расходуется на совершение работы?
2. Как называется процесс, в котором изменение внутренней энергии газа равно полученному (отданному) телом количеству теплоты?
- 3.\* Какой процесс называется адиабатным?
- 4.\* Чему равна работа газа, совершенная при адиабатном процессе?
- 5.\* Как изменяется температура идеального газа при адиабатном процессе?
6. Идеальный газ в сосуде получил количество теплоты  $Q = 490$  Дж, и его внутренняя энергия возросла на  $\Delta U = 350$  Дж. Чему равна совершенная газом работа?
7. Идеальный газ переведен из начального состояния 1 в конечное 2 двумя путями: один раз по пути  $1a2$ , а второй раз — по пути  $1b2$ . В первом случае газ получил количество теплоты  $Q_a = 1800$  Дж и совершил работу  $A_a = 1050$  Дж. Какую работу совершил газ при втором переходе, если полученное количество теплоты  $Q_b = 2250$  Дж?
8. В герметическом сосуде объемом  $V = 0,2 \text{ м}^3$  находится одноатомный идеальный газ при давлении  $p = 2 \cdot 10^5$  Па. Чему будет равно давление газа, если он получит количество теплоты, равное  $Q = 45$  кДж?
9. При изобарном нагревании газа при давлении  $p = 10^5$  Па его внутренняя энергия возросла на  $\Delta U = 9$  кДж, а объем на  $\Delta V = 0,06 \text{ м}^3$ . Определите работу, совершенную газом, и полученное количество теплоты.
10. Одному молю идеального газа при температуре  $T_1 = 310$  К изобарно передают количество теплоты в  $Q_p = 1452,5$  Дж. В результате внутренняя энергия возросла на  $\Delta U = 1037,5$  Дж. Определите конечную температуру газа. Примите  $R = 8,3 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .
11. Удельная теплоемкость некоторого газа при постоянном объеме  $c_V = 649,22 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , а при постоянном давлении  $c_p = 908,91 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ . Какой это газ?

Тепловые двигатели превращают внутреннюю энергию топлива в механическую энергию. Их применение способствовало техническому прогрессу в промышленности и транспорте, играло и продолжает играть важную роль в жизни людей.

Во второй половине XVII века многие инженеры из разных стран пробовали строить тепловые машины, в которых механическая работа совершалась бы при расширении водяного пара. В Англии инженер французского происхождения Дени Папин (1647–1712) первым предложил в 1690 году использовать с этой целью цилиндр с поршнем. Под поршнем цилиндра находился воздух и была налита вода. При нагревании она испарялась и водяной пар вместе с воздухом в цилиндре поднимал поршень. Для его возвращения в начальное состояние цилиндр охлаждался водой, пар конденсировался, поршень опускался вниз и поднимал различные тела с помощью блоков. Так совершалась механическая работа. Тепловая машина Папина была неэффективной и не применялась на практике. Папин также изобрел паровой котел с предохранителем для получения перегретого пара.

В 1711 году англичанин Томас Ньюкомен (1663–1729) сконструировал более совершенную машину. Паровой котел был отделен от цилиндра с поршнем, поэтому такие машины стали называть **двигателями внешнего сгорания**. Охлаждение пара проводилось в цилиндре, как и в машине Папина. Машины Ньюкомена применялись для откачки воды из шахт около 60 лет.

Значительно более совершенную **паровую машину** с принципиально новыми конструкторскими решениями построил в 1784 году английский изобретатель Джеймс Уатт, начавший с усовершенствования машины Ньюкомена.

Более ста лет паровые машины были главными двигателями в промышленности. Затем область их применения постепенно сузилась. Были изобретены более совершенные двигатели. Паровозы использовались до середины XX века. В наше время паровые машины еще встречаются на кораблях.

### **а. Двигатели внутреннего сгорания**

Путь пара от котла до паровой машины или турбины сопровождается определенными потерями энергии в паропроводах. Потери значительно уменьшаются, если топливо сгорает внутри цилиндра. Правда, можно использовать не любое топливо (уголь нельзя!). Применяют нефтепродукты: бензин, дизельное топливо.

Главная заслуга в создании первого двигателя внутреннего сгорания принадлежит немецкому изобретателю Николаусу Отто (1832–1891). Вместе с инженером Э. Лангеном он в 1876 году создал четырехтактный двигатель внутреннего сгорания на газовом топливе, а 1878 году – на бензине.

В **двигателе внутреннего сгорания** есть элементы, сходные с имеющимися у паровой машины: цилиндр с поршнем, кривошипно-шатунный механизм, вал, но есть и отличные: карбюратор для получения горючей смеси (пары бензина с воздухом), свеча, создающая электрическую искру с целью зажигания этой горючей смеси, и электрическая система питания свечи.

На рисунке 2.20 показана схема двигателя внутреннего сгорания (двигателя **Отто**). Канал 1 соединяет пространство цилиндра с карбюратором. Канал 2 соединяет данное пространство с атмосферой, куда выталкиваются продукты сгорания топлива. Клапаны 3 и 4 открывают или закрывают эти каналы в соответствующие моменты. Свеча 5 создает электрическую искру, зажигающую горючую смесь, и температура резко возрастает, образовавшиеся газы, имея большое давление, приводят в движение поршень, который через шатун 7 и кривошип 8 приводит во вращение вал 9.

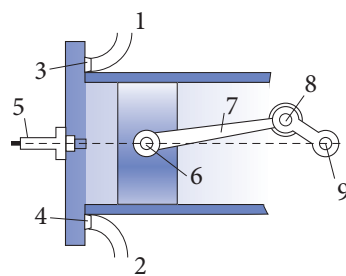


Рис. 2.20

Проанализируем работу двигателя и построим соответствующую диаграмму (рис. 2.21). Перемещение поршня между крайними положениями называется **тактом**. Допустим, в начальный момент поршень находится в крайнем левом положении (рис. 2.20), объем цилиндра в соответствующей части равен  $V_1$ . Открывается впускной клапан 3, а выпускной клапан закрыт. Поршень 6 движется вправо, пока объем не достигнет значения  $V_2$ . В цилиндр всасывается горючая смесь при давлении  $p_1$ , в конце такта клапан 3 закрывается. Этот такт называется **всасыванием** и представлен на диаграмме (рис. 2.21) изобарой (1→2).

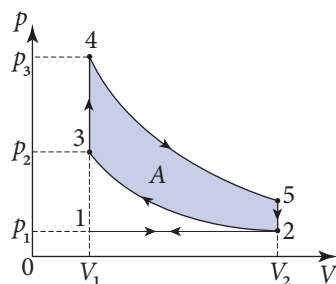


Рис. 2.21

Следующий, второй такт – **адиабатное сжатие**: оба клапана закрыты, поршень движется влево, объем уменьшается от  $V_2$  до  $V_1$ , давление растет от  $p_1$  до  $p_2$ . На диаграмме такту соответствует адиабата (2→3). Третий такт – горючая смесь поджигается искрой, давление резко возрастает от  $p_2$  до  $p_3$ , объем остается постоянным (изохора 3→4). Следует **адиабатное расширение** (4→5) горячих газов от  $V_1$  до  $V_2$ . Этот такт называется **рабочий ход** – газ совершает механическую работу. В конце расширения открывается выпускной клапан 4 (рис. 2.20), давление в цилиндре падает до  $p_1$  (изохора 5→2). При движении поршня влево объем уменьшается от  $V_2$  до  $V_1$ . Этот такт – **выпуск** продуктов сгорания из цилиндра (изобара 2→1). Цикл замкнулся. Изобары (1→2) и (2→1) (такты первый и четвертый) являются вспомогательными для цикла, представленного на графике 2→3→4→5→2.

В 1887 году был получен патент на другой тип четырехтактного двигателя внутреннего сгорания, который в 1892 году построил немецкий инженер Рудольф Дизель (1858–1913). В этом двигателе топливо вводится в цилиндр топливной форсункой с распылителем, а воздух в цилиндр засасывается отдельно.

Построим диаграмму **двигателя Дизеля** (рис. 2.22). В первом такте через впускной клапан всасывается воздух (изобара 1→2), затем в следующем такте он адиабатно сжимается (2→3). При таком сжатии температура воздуха достигает 500–600 °С. В это время форсункой впрыскивается в цилиндр жидкое топливо в мелкораспыленном состоянии. Оно самовоспламеняется от высокой температуры и сгорает при постоянном давлении, объем же растет от  $V_1$  до  $V_3$  (изобара 3→4). Прекращается поступление и сгорание топлива, продукты сгорания адиабатно расширяются до

максимального объема  $V_2$  (адиабата 4→5). График 3→4→5 представляет рабочий ход (третий такт). Когда объем достигает значения  $V_2$ , открывается выпускной клапан, давление в цилиндре резко падает до  $p_1$  (изохора 5→2), затем следует движение поршня влево и выталкивание продуктов сгорания (изобара 2→1). Как и во всяком цикле, механическая работа численно равна площади фигуры, ограниченной линиями графика цикла (рис. 2.22).

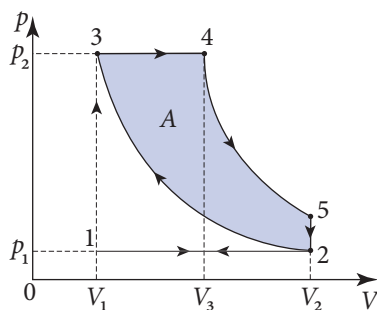


Рис. 2.22

Часто двигатели внутреннего сгорания изготавливают с несколькими цилиндрами. С помощью кривошипно-шатунного механизма вращается общий вал, называемый **коленчатым валом**. Работа двигателя рассчитывается таким образом, чтобы такт “рабочий ход” был поочередно в каждом из цилиндров. Так обеспечивается рост мощности двигателя и равномерное вращение вала.

Двигатели внутреннего сгорания широко применяются в различных областях человеческой деятельности. Двигатели Отто (карбюраторные) приводят в движение автомобили, самолеты, вертолеты и др., а двигатели Дизеля применяются на тепловозах, тракторах, самосвалах большой грузоподъемности, морском и речном транспорте и т.д.

## 6. Принцип действия тепловых двигателей. КПД

Во всех типах двигателей совершающий работу газ (пар) имеет высокую температуру, большое давление, является частью теплового двигателя и называется **рабочим телом**.

Все тепловые двигатели работают циклично. Каждая новая порция газа (рабочее тело) проходит поочередно одни и те же стадии: рабочее тело расширяется при высоких температуре и давлении и сжимается при низких температуре и давлении.

Рассмотрим энергетический баланс одного цикла.

При расширении рабочее тело получает количество теплоты  $Q_1$  при высокой температуре от тела, называемого **нагревателем**.

При сжатии рабочее тело отдает количество теплоты, абсолютное значение которого равно  $Q_2$  другому телу – **холодильнику** (например, атмосфере). Так как рабочее тело отдает это количество теплоты, то его температура уменьшается. Сжатие происходит при меньших значениях температуры и давления. Механическая работа, необходимая для сжатия рабочего тела, оказывается меньше, чем работа, совершаемая им при расширении. Работа за весь цикл будет положительной.

Итак, из изложенного выше следует, что нагреватель и холодильник являются составными частями теплового двигателя. Без любого из них кривая сжатия совпадет с кривой расширения и работа двигателя за цикл равна нулю.

Для работы, совершаемой рабочим телом за один цикл, запишем соотношение (2.27):

$$A = Q_1 - Q_2, \quad (2.39)$$

являющееся следствием первого закона термодинамики.

Обобщив все сказанное выше, мы можем представить принцип работы теплового двигателя в виде схемы (рис. 2.23). Она содержит основные элементы двигателя: нагреватель, рабочее тело и холодильник. Показаны передаваемые количества теплоты и совершаемая работа.

Тепловой двигатель работает тем эффективней, чем большую долю количества теплоты  $Q_1$ , полученную рабочим телом от нагревателя, он превращает в механическую работу. Эффективность двигателя характеризуется величиной:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (2.40)$$

которая называется **коэффициентом полезного действия (КПД)**. Так как холодильнику передается количество теплоты  $Q_2$ , КПД имеет значение  $\eta < 1$ . Обычно КПД выражают в процентах.

КПД различных тепловых двигателей имеют следующие значения:

<i>паровые машины</i>	$\eta = 7 \div 15\%$	<i>карбюраторные двигатели (Отто)</i>	$\eta = 18 \div 24\%$
<i>паровые турбины</i>	$\eta = 20 \div 25\%$	<i>дизельные двигатели</i>	$\eta = 30 \div 39\%$

Одной из главных задач в машиностроительной промышленности является повышение КПД двигателей.

### в.\*Холодильные машины

Холодильные машины – холодильники, морозильники, кондиционеры и т.п. позволяют получать температуру ниже, чем у окружающей среды. Они широко используются в пищевой промышленности, торговле, на транспорте – для сохранения качества продуктов, особенно скоропортящихся, в медицине – для сохранения медикаментов, различных препаратов и т.д.

Ознакомимся с принципом действия бытового холодильника, называемого компрессионным (рис. 2.24).

Компрессор 1, приводимый в действие электродвигателем 2, обеспечивает циркуляцию хладагента по замкнутой системе труб холодильника. В качестве хладагентов чаще всего используют фреоны – фторхлоруглеродороды, – газы, легко сжижающиеся при сжатии. Пары фреона откачивают по трубе 3 из испарителя и по трубе 4 нагнетают в конденсатор, где из-за роста давления они конденсируются в змеевике 5 на задней стенке холодильника, отдавая тепло окружающей среде. По узкой (капиллярной) трубке 6 уже под низким давлением фреон попадает в испаритель 7, расположенный внутри холодильника. Здесь фреон испаряется, отбирая необходимое для этого тепло у

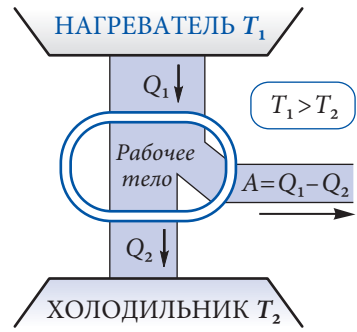


Рис. 2.23

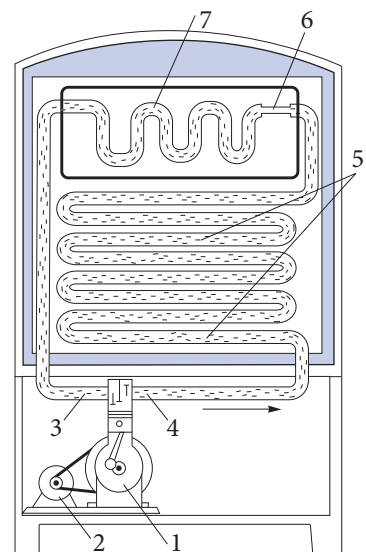


Рис. 2.24

окружающих тел, вызывая их охлаждение. Затем по трубе 3 фреон опять попадает в компрессор и процесс повторяется. Для поддержания в холодильнике необходимого температурного режима в нем имеется тепловое реле, автоматически включающее и отключающее электродвигатель компрессора.

Холодильник, как и тепловые двигатели, имеет три основные части: рабочее тело – хладагент (фреон), холодильник (тела внутри холодильной камеры) и нагреватель (окружающая среда). Во время работы холодильника тела внутри холодильной камеры при температуре  $T_2$  отдают количество теплоты  $Q_2$  испаряющемуся хладагенту. Над ним совершается внешняя механическая работа  $A' = -A$  (механическая работа  $A$ , совершаемая хладагентом, отрицательна, так как при сжатии компрессором его объем уменьшается). В результате этого хладагент передает нагревателю, находящемуся при более высокой температуре  $T_1$ , количество теплоты, абсолютная величина которого равна  $Q_1$ . В соответствии с первым началом термодинамики в нашем случае  $A = Q_2 - Q_1$  или  $A' = Q_1 - Q_2$ , значит  $Q_1 = Q_2 + A'$ . Количество теплоты, переданное нагревателю, больше полученного от холодильника на величину работы, совершенной внешними силами (компрессором) над хладагентом. Схема энергетических процессов в холодильнике показана на рис. 2.25.

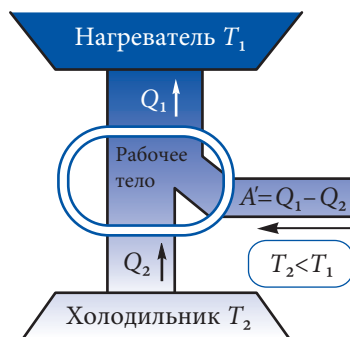


Рис. 2.25

В отличие от двигателя внутреннего сгорания, где циклический процесс над рабочим телом происходит в одном месте – цилиндре, циклический процесс над хладагентом проходит в различных местах замкнутой системы труб, по которым он циркулирует. В этом процессе сжатие газа в трубе 4 происходит при высоких давлениях и температуре. Следовательно, цикл проходит в направлении против движения часовой стрелки (см. рис. 2.5, б), работа  $A$ , совершаемая системой, отрицательна, а внешние силы совершают над системой положительную работу  $A' = -A$ .

Эффективность холодильной установки характеризуется **холодильным коэффициентом**, равным отношению количества теплоты  $Q_2$ , отводимого от холодильника внешними силами за цикл, к механической работе  $A'$ , совершаемой внешними силами за этот же цикл:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}. \quad (2.41)$$

Холодильный коэффициент может иметь значение и выше единицы или, в процентах, больше 100 %.

Холодильную машину можно использовать как **тепловой насос**. Представьте себе холодильную машину, у которой испаритель находится вне помещения, а компрессор и система труб со сжатым фреоном внутри него. Работа этой холодильной машины сопровождается переносом количества теплоты  $Q_2$  от тел вне здания (атмосферный воздух, водоем) внутрь здания, кроме того, одновременным преобразованием использованной работы  $A'$  в тепло и перенос его внутрь здания. Итак, здание получит количество теплоты  $Q_1 = Q_2 + A'$ , которое может быть в несколько раз больше тепла, выделившегося благодаря тепловому эффекту электрического тока, использованного для приведения в действие холодильной машины. Тепловой насос может быть ис-



пользован в качестве эффективной системы для обогрева помещений, что и делается в скандинавских и некоторых западноевропейских странах.

### Пример решения задачи

**Дано:**

$$n = \frac{Q_2}{A} = 4$$

$\eta$  – ?

Количество теплоты, отданное тепловой машиной холодильнику за 1 цикл, в 4 раза больше совершенной механической работы. Чему равен КПД этой машины?

### Решение

Коэффициент полезного действия тепловой машины вычисляется по формуле (2.40):

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

где  $Q_1$  – это количество теплоты, сообщенное рабочему телу, а  $A$  – совершенная им механическая работа. Согласно (2.39) она равна разности между количеством теплоты  $Q_1$ , полученным рабочим телом, и  $Q_2$ , отданным холодильнику:

$$A = Q_1 - Q_2,$$

откуда

$$Q_1 = A + Q_2 = A + nA.$$

Таким образом, для коэффициента полезного действия получаем:

$$\eta = \frac{A}{(1+n)A} = \frac{1}{1+n}; \quad \eta = 20 \text{ \%}.$$

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Чем отличается питание топливом двигателя Дизеля от питания карбюраторного двигателя Отто?
2. Постройте диаграмму цикла двигателя Отто. В каких ее местах рабочее тело получает количество теплоты  $Q_1$ , а в каких отдает количество теплоты  $Q_2$ ?
3. Дайте ответы на вопросы задания 2 в случае двигателя Дизеля.
4. Из каких главных частей состоит тепловой двигатель?
5. Дайте определение КПД теплового двигателя. Какие он может иметь значения?
- 6.\*Как определяется холодильный коэффициент? Какие он может иметь значения?
7. За один цикл тепловой двигатель получил от нагревателя количество теплоты, равное 1 200 Дж, и из них 927 Дж отдал холодильнику. Определите КПД двигателя.
8. Тепловой двигатель за один цикл отдал холодильнику 2 040 Дж энергии. Какая механическая работа была совершена за это время, если КПД двигателя равен 32 %?
- 9.\*Холодильник передает нагревателю количество теплоты, в 4 раза большее совершенной компрессором механической работы. Определите холодильный коэффициент холодильника.
- 10.\*Определите количество теплоты, отданное нагревателю хладагентом за время, в течение которого он получил от холодильной камеры количество теплоты, равное 870 Дж, если холодильный коэффициент  $\varepsilon = 3$ .

**а.\* Обратимые и необратимые процессы**

Проанализируем подробнее одну из основных характеристик термодинамических процессов.

Возьмем цилиндр с поршнем, изготовленные из термоизолирующего материала. Пусть трение между поршнем и стенками цилиндра полностью отсутствует. Таким образом, идеальный газ под поршнем адиабатно изолирован. Пусть на поршне имеется стержень с горизонтальным столиком 1, на который можно сыпать песчинки 2 с неподвижных полочек 3 (рис. 2.26, а). Песчинки перемещаются с полочек на столик, находящийся на их уровне, и при таком перемещении не требуется совершать механическую работу. Переместим горизонтально несколько песчинок с верхней полочки на столик. Внешнее давление слегка возрастет и поршень опустится немного вниз. Продолжим перенос песчинок на столик с полочек, находящихся на его уровне. Так осуществляется очень медленное адиабатное сжатие газа в цилиндре (рис. 2.26, б).

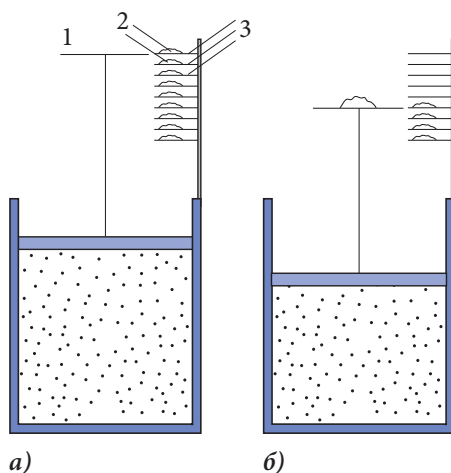


Рис. 2.26

При достаточно медленном сжатии концентрация молекул газа, одинаковая во всем объеме, растет по мере его уменьшения. Давление и температура газа имеют одни и те же значения в любой момент времени в любой области цилиндра. Мы можем утверждать, что в любой момент времени газ находится в состоянии теплового равновесия, каждый раз в ином. Итак, во время всего процесса очень медленного сжатия газ под поршнем переходит из одного состояния теплового равновесия в другое.

Представим себе процесс расширения газа, происходящий в результате постепенного перемещения песчинок со столика на полочки, мимо которых столик перемещается. Расширение газа очень медленное, и он в любой момент времени находится в состоянии теплового равновесия. Газ, медленно расширяясь, проходит через те же состояния теплового равновесия, через которые он проходил при сжатии, но в обратной последовательности. Когда газ возвращается в первоначальное состояние, песчинки попадают на соответствующие полочки таким образом, что во внешней среде не происходит никаких изменений.

**Процессы, которые можно реализовать в обратном направлении, когда при возвращении в первоначальное состояние не происходит никаких изменений во внешней среде, называются обратимыми.** Ранее было установлено, что процессы являются обратимыми, если в любой момент времени исследуемая система находится в состоянии теплового равновесия. Если медленное сжатие считается прямым процессом, то обратным будет медленное расширение.

Рассмотрим способ адиабатного сжатия газа, сходный с предыдущим, но без системы полочек. Допустим, что с большой высоты на поршень цилиндра падает массивное тело (рис. 2.27, а). При неупругом соударении тела с поршнем они движутся вместе с большой скоростью. Объем газа уменьшается настолько быстро, что молекулы газа не успевают распределиться равномерно по всему объему. Их концентрация около поршня становится больше, чем у дна цилиндра (рис. 2.27, б). Молекулы возле поршня после соударения с ним получают дополнительные импульсы, то есть их средняя кинетическая энергия больше, чем у молекул около дна цилиндра, и давление, производимое газом на поршень, больше давления газа на дно цилиндра. Такое состояние газа не является состоянием теплового равновесия. Но если поршень с телом на нем остановится, то через некоторое время газ перейдет в состояние равновесия: концентрация молекул, давление и температура станут одинаковыми во всех областях, занятых газом.

Очевидно, обратный процесс невозможен. При резком движении поршня вверх, молекулы газа отстанут и концентрация их около поршня будет меньше, чем у дна цилиндра, а при медленном движении, как мы видели, концентрация одинакова во всем цилиндре. Газ в нашем опыте нельзя расширить таким образом, чтобы концентрация молекул около поршня была больше, чем у дна цилиндра, как было при сжатии. Следовательно, процессы быстрого сжатия или быстрого расширения – **процессы необратимые**. Как видно, при прохождении необратимого процесса газ проходит через неравновесные состояния.

Итак, **термодинамические процессы делятся на обратимые и необратимые**.

Проанализируем другой пример. Пусть имеется сосуд, разделенный на две части перегородкой с закрытым отверстием. Одна часть сосуда заполнена газом, в другой – вакуум (рис. 2.28, а). Что случится, если мы откроем отверстие? Газ начнет занимать только часть предоставленного объема, и при этом он не находится в состоянии теплового равновесия. Постепенно газ переходит в другую часть сосуда (рис. 2.28, б), а спустя некоторое время концентрация его молекул и другие параметры, характеризующие его, примут одинаковые значения во всех областях сосуда. Газ перешел в состояние теплового равновесия.

Переход произошел самопроизвольно, через неравновесные состояния, это неравновесный процесс. Обратный процесс, когда газ самопроизвольно собирается в левой части сосуда (рис. 2.28), в природе не происходит. Для перевода газа в начальное состояние нужно совершить работу внешних сил для его сжатия.

Очевидно, что и теплообмен между двумя телами с разными температурами – необратимый процесс. Система, состоящая из этих двух тел, не находится в тепловом равновесии – температура в разных частях системы неодинакова.

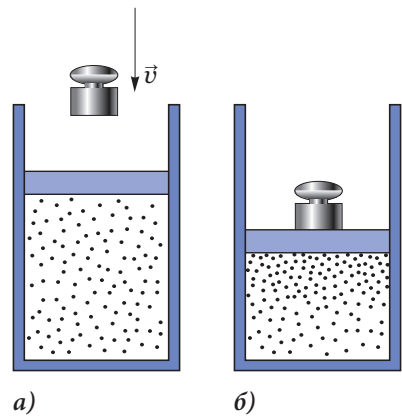


Рис. 2.27

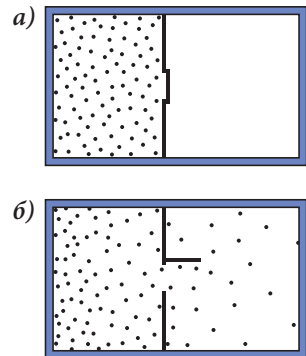


Рис. 2.28

Между телами происходит теплообмен – от горячего тела к холодному, температура горячего тела уменьшается, а холодного растет. Теплообмен продолжается до уравнивания температур, когда система переходит в состояние теплового равновесия.

Обратный процесс – переход тепла от холодных тел к горячим – самопроизвольно не происходит. Переход тепла от холодного тела к горячему возможен при совершении работы внешними силами (случай холодильника).

Итак, обратимые процессы реализуются только в идеальных условиях (полное отсутствие сил трения, очень медленное изменение объема). Обратимые процессы – это идеальные модели, позволяющие упрощенно анализировать реальные, сложные процессы в природе. А они все же являются процессами необратимыми, самопроизвольно протекающими в одном направлении.

## 6.\* Второй закон термодинамики

Вспомним, что первый закон термодинамики – это закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым процессам. В соответствии с этим законом в природе осуществляются только те процессы, в которых сумма разных форм отданной энергии одними телами непременно равна сумме полученных энергий другими телами. Первый закон запрещает действие теплового двигателя, который бы совершал механическую работу без потребления тепла (так называемый *вечный двигатель первого рода*).

Представим себе такие процессы, в которых первый закон соблюдается, но они в природе не происходят.

Пусть имеется тело, нагретое до высокой температуры, то есть обладающее значительной внутренней энергией. Вдруг тело самопроизвольно начинает подниматься вверх, охлаждаясь по мере подъема. Рост потенциальной энергии (механической) сопровождается соответствующим уменьшением внутренней энергии тела.

Ещё пример. В калориметр с водой опускается нагретое тело. Представим себе, что вода начинает охлаждаться и замерзает, а тело нагревается еще больше за счет полученного от воды тепла.

В этих и во многих других примерах такого типа, которые можете придумать и вы, первый закон термодинамики соблюдается, закон сохранения энергии выполняется, но подобные явления не встречаются в природе. Самопроизвольно процессы протекают только в определенном направлении. Это направление определяет, а точнее, запрещает обратное, подчеркивает необратимость процессов в природе второй закон термодинамики. Известно много формулировок второго закона. Вот первая, предложенная Р.Клаузиусом в 1850 году:

**теплота не может переходить сама собой от холодного тела к горячему.**

Эту формулировку надо понимать не только в прямом смысле, а шире:

**невозможно создать периодическую тепловую машину, единственным результатом действия которой был бы переход тепла от холодного тела к горячему.**

Схема периодической машины такого рода показана на *рис. 2.29*. После каждого цикла рабочее тело возвращается в одно и то же начальное состояние, с ним не происходит никаких изменений – холодильник отдает количество теплоты  $Q$  нагревателю, имеющему более высокую температуру.

Отметим, что запрет, введенный в формулировку Клаузиуса, принципиальный, он не зависит от уровня развития техники. "Запрещенная" машина не может быть создана никогда.

Тепловые периодические машины, передающие тепло от холодных тел к нагретым, на самом деле существуют – это холодильники. Но этот процесс сопровождается совершением механической работы внешними силами, то есть определенными изменениями снаружи: сгоранием топлива на теплоэлектростанции или, допустим, перемещением масс воды с высокого уровня на низкий, но гидроэлектростанции. Формулировка Клаузиуса указывает на невозможность работы холодильника без электрического тока или другого источника энергии.

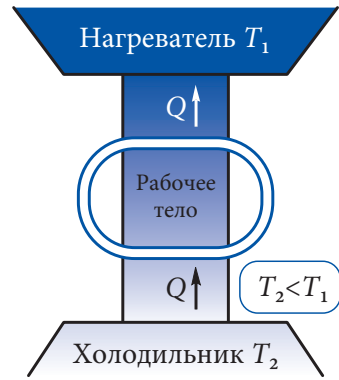


Рис. 2.29

Еще одну формулировку предложил в 1851 году В.Томсон:

**невозможен процесс, единственным результатом которого было бы полное превращение теплоты в механическую работу.**

На первый взгляд, она противоречит установленному выше факту (п. 2.4), что в изотермическом процессе все полученное количество теплоты превращается в механическую работу. Однако в результате расширения объем газа увеличивается, так что полное превращение тепла в механическую работу – не единственный результат такого процесса.

Немецкий физик Макс Планк (1858–1947) предложил для тепловых двигателей свою формулировку второго закона, используя формулировку Томсона:

**невозможен периодический процесс, единственным результатом которого было бы полное превращение в механическую работу теплоты, полученной от нагревателя.**

Эта формулировка Томсона–Планка запрещает работу теплового двигателя без холодильника (рис. 2.30). Вы знаете, что тепловой двигатель (рис. 2.23) превращает в механическую работу только часть количества теплоты  $Q_1$ , полученного рабочим телом, а часть  $Q_2$  непременно передает холодильнику. То есть невозможна работа теплового двигателя с  $Q_2 = 0$ , (с КПД  $\eta = 1$ ). Тепловой двигатель с  $Q_2 = 0$  и  $\eta = 1$  (рис. 2.30) мог бы использовать огромные ресурсы внутренней энергии, существующие в природе, например, воды в океане. Подсчитано, что энергия, полученная от охлаждения этой воды на  $0,1^\circ\text{C}$  достаточна для удовлетворения потребностей населения Земли в энергии на протяжении 200 лет. Такой тепловой двигатель называется **вечным двигателем второго рода**. Его функционирование невозможно, а вот огромную внутреннюю энергию воды океана в качестве нагревателя применить можно в реальном тепловом двигателе (схему действия см.рис. 2.23). Нужно только обязательно использовать какие-то другие тела в качестве холодильника.

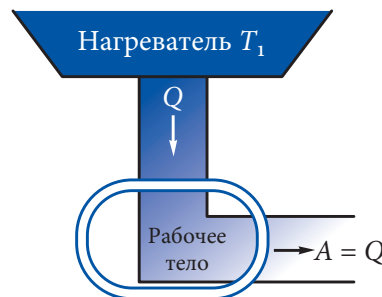


Рис. 2.30

Методы термодинамики позволяют доказать равноправие приведенных выше формулировок второго закона. Существуют и другие формулировки, использующие сложный математический аппарат.

### в. Цикл Карно. Максимальное значение КПД

Работу различных тепловых двигателей оценивают по величине КПД. Он принимает значение в широком интервале – от 7–15 % для паровых машин до 30–39 % для двигателей Дизеля. КПД теплового двигателя не может достичь единицы:  $\eta < 1$  ( $\eta < 100\%$ ). Важно знать, чему равны максимально возможные значения КПД реальных двигателей, насколько они отличаются от 100 % и как их повысить.

Эту задачу огромного практического значения впервые исследовал Никола Леонард Сади Карно – французский физик, который предложил цикл идеальной обратной тепловой машины, именуемый **циклом Карно**. Он состоит из двух изотерм и двух адиабат.

Идеальный газ из начального состояния 1 расширяется изотермически до состояния 2, температура остается постоянной, равной начальной  $T_1$  (рис. 2.31). При этом переходе газ получает от нагревателя количество теплоты  $Q_1$  и совершает положительную механическую работу. Затем следует адиабатное расширение без теплообмена с внешней средой. Температура уменьшается до  $T_2$  (участок 2–3 на рис. 2.31). При температуре  $T_2$  газ изотермически сжимается (3–4) до такого объема, что может затем при адиабатном сжатии вернуться в начальное состояние 1. В процессе изотермического сжатия газ отдает внешней среде (холодильнику) количество теплоты  $Q_2$  и совершает отрицательную механическую работу.

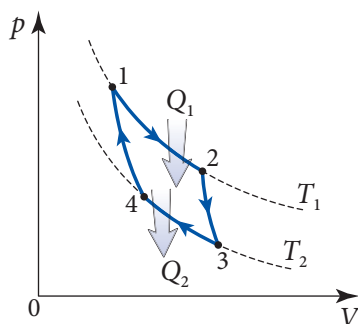


Рис. 2.31

В соответствии с определением КПД (2.40),

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

Проведя соответствующие расчеты для КПД обратимого цикла Карно с идеальным газом, получено выражение:

$$\eta_{\text{обр.}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.42)$$

Карно показал, что это выражение, выведенное для обратимого цикла, когда рабочим телом является идеальный газ, остается верным для рабочего тела любой природы. Итак,

**КПД машины Карно зависит только от температур тел, с которыми рабочее тело совершает теплообмен.**

Коэффициент полезного действия необратимой машины, однако, меньше величины, определяемой по формуле (2.42):

$$\eta_{\text{необр.}} < \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (2.43)$$



Один из создателей термодинамики. В работе “Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развить эту силу”, опубликованной в 1824 году за свой счет, приступил к решению проблемы увеличения КПД тепловых двигателей, заложив теоретические основы термодинамики. Исходя из невозможности функционирования вечного двигателя, показал, что механическую работу можно совершить только, если часть тепла, полученного от горячего тела передать холодному телу. То есть Карно за 25 лет до Клаузиуса и Томсона использовал в своей работе идею второго закона термодинамики.

Доказано, что формула (2.42) представляет собой максимально возможное значение КПД теплового двигателя, то есть:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (2.44)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – температуры нагревателя и холодильника. Любой другой цикл имеет КПД, меньший, чем у цикла Карно.

Формула (2.44) выражает предельную величину КПД для реальных двигателей. Рассмотрим конкретные примеры. Температура нагревателя и холодильника паровой машины приблизительно равны:  $T_1 = 480$  К и  $T_2 = 300$  К. Максимальный КПД для этой машины  $\eta_{\max} \approx 37\%$ , а у реальных паровых машин: 7–15 %.

В случае двигателей Отто и Дизеля  $T_1 \approx 2100$  К и  $T_2 \approx 380$  К, максимальный КПД равен  $\eta_{\max} = 82\%$ . У реальных двигателей Отто КПД между 18 и 24 %, а у двигателей Дизеля 30–39%.

Следовательно, КПД тепловых двигателей и сегодня значительно меньше максимально возможных. Существует множество способов усовершенствования двигателей, уменьшения потерь энергии, снижения трения, улучшения других характеристик.

### Пример решения задачи

#### Дано:

$$t_1 = 127^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 27^\circ\text{C},$$

$$A = 15 \text{ кДж}$$

$$Q_1 - ?, Q_2 - ?$$

#### СИ:

$$400 \text{ К},$$

$$300 \text{ К},$$

$$15 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$\text{Дж}$$

Тепловая машина Карно совершает механическую работу 15 кДж. Определите количество теплоты, отданное холодильнику и полученное от нагревателя, если их температуры равны 27 °С и 127 °С, соответственно.

### Решение

Для определения коэффициента полезного действия тепловой машины Карно применимы как выражения (2.42), так и (2.41):

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

откуда

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

Работа тепловой машины равна разности между количеством теплоты, полученным рабочим телом  $Q_1$  и отданным холодильнику  $Q_2$ :

$$A = Q_1 - Q_2,$$

откуда

$$Q_1 = A + Q_2.$$

Таким образом, введя последнее соотношение в выражение для отношения температур, выведенного из формулы для коэффициента полезного действия, получим:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{A + Q_2},$$

откуда

$$Q_2 = \frac{T_2}{T_1 - T_2} A; \quad Q_2 = 45 \text{ кДж}.$$

Для количества теплоты, полученного от нагревателя, получаем:

$$Q_1 = A + Q_2 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} A; \quad Q_1 = 60 \text{ кДж}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

- 1.\* Небольшая часть циклического процесса необратима, остальная – обратима. Что мы можем сказать об этом циклическом процессе: он обратим или необратим?
- 2.\* Что из себя представляет вечный двигатель первого рода?
- 3.\* Какой тепловой двигатель “запрещен” вторым началом термодинамики в формулировке Клаузиуса?
- 4.\* Чем отличается формулировка второго закона термодинамики, предложенная Томсоном, от формулировки Томсона–Планка?
- 5.\* Какой из законов термодинамики запрещает, а какой не запрещает возможность создания вечного двигателя второго рода? Обоснуйте ответ.
6. Из каких процессов состоит цикл Карно? В каких из них рабочее тело получает и в каких отдает тепло?
7. От каких факторов зависит КПД обратимого цикла Карно? Зависит ли он от химического состава рабочего тела?
8. Двигатель совершает цикл Карно. Найдите его КПД, если температура нагревателя равна  $427^\circ\text{C}$ , а холодильника  $7^\circ\text{C}$ .
9. Температура холодильника в цикле Карно равна  $9^\circ\text{C}$ . Чему равна температура нагревателя, если КПД двигателя равен 40 %?
10. На протяжении цикла Карно рабочее тело получило от нагревателя количество теплоты, равное 300 кДж. Температура нагревателя равна 450 К, а холодильника 285 К. Определите количество теплоты, переданное холодильнику.
11. Двигатель Карно совершает механическую работу в 214 Дж и в то же время передает холодильнику количество теплоты 321 Дж. Чему равна температура нагревателя, если температура холодильника равна  $21^\circ\text{C}$ ?



Хорошо известна роль тепловых двигателей в техническом прогрессе человечества. Но их применение оказывает негативное влияние на окружающую среду.

**Тепловые двигатели** потребляют во время работы различное горючее: уголь, мазут, дизельное топливо, керосин, бензин, природный газ и др. Во время их сгорания в атмосфере уменьшается количество кислорода и растет количество углекислого газа. Кроме того, топливо содержит примеси, например серу (около 2% – уголь, 2,5% – нефть, около 0,05% – природный газ). Использование горючих веществ сопровождается выделением в атмосферу соединений серы (сернистого газа –  $\text{SO}_2$ , сероводорода –  $\text{H}_2\text{S}$ ). Горение угля сопровождается выбросом в атмосферу огромного количества пыли (золы). Чтобы избежать детонации бензина в двигателях автомобилей, к нему добавляют соединения свинца, которые затем вместе с отработанными газами выбрасываются в атмосферу. Тепловые двигатели выбрасывают в атмосферу и окислы азота.

С развитием техники и расширением применения тепловых двигателей количество пыли и отработанных газов в атмосфере становится все больше. Так, за один год на Земле в атмосферу попадает около 20 миллиардов тонн углекислого газа (двуокиси углерода –  $\text{CO}_2$ ), 200 миллионов тонн окиси углерода ( $\text{CO}$ ), 150 миллионов тонн соединений серы, 50 миллионов тонн окислов азота, 250 миллионов тонн пыли. На территории Республики Молдова в атмосферу ежегодно выбрасывается около 9 миллионов тонн углекислого газа, 160 тысяч тонн окиси углерода, 500 тонн окислов азота и т.д.

Каковы последствия этой стороны применения тепловых двигателей?

Во-первых, продукты сгорания, попадающие в атмосферу, имеют высокую температуру и напрямую нагревают ее.

Во-вторых, они уменьшают прозрачность атмосферы. Известно, что главным источником энергии для Земли является Солнце. Земля в свою очередь излучает энергию. Устанавливается определенный баланс между энергией, полученной Землей от Солнца, и энергией, которую Земля излучает в космос. Газы, выделившиеся в атмосферу, поглощают часть энергии, излучаемой Землей, что способствует росту ее температуры. Это явление называют **парниковым эффектом**. Рост температуры приводит к изменению климата, таянию ледников, подъему уровня воды в океанах, росту количества водяных паров в атмосфере, парниковый эффект становится более выраженным и т.д.

В-третьих, некоторые газы ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  и др.) вступают в реакцию с водяными парами и образуют мелкие капельки растворов кислот. Они выпадают в виде кислотных дождей, влияющих на жизнь растений и животных, увеличивают кислотность почвы, ускоряют коррозию металлов, разрушают сооружения из мрамора, известняка и т.д.

Для уменьшения отрицательных эффектов использования тепловых двигателей предпринимаются различные меры. Например, обеспечивается более полное сгорание топлива: на тепловых электростанциях: уголь предварительно измельчают; двигатели автомобилей регулируют так, чтобы содержание оксида углерода в выхлопных газах сводилось к минимуму и т.д.

Кроме того, перед выбросом в атмосферу очищаются продукты сгорания. Так, для уменьшения проникновения соединений серы в атмосферу к угольной пыли или к мазуту, применяемым на тепловых электростанциях, добавляется известняк, вступающий в реакцию с соединениями серы. Трубы электростанций снабжаются электростатическими фильтрами, извлекающими твердые частички дыма (пыль).

Продолжается работа по совершенствованию двигателей, увеличению их КПД. Переходят от карбюраторных двигателей к дизельным (с большим КПД). Так экономится топливо и нет выброса соединений свинца в атмосферу.

Ведутся работы по улучшению качества топлива, идеалом является экологически чистое топливо. Природный газ фильтруется для очистки от примесей. Испытываются автомобильные двигатели, работающие на водороде (где продукт сгорания – водяной пар), на этиловом спирте (получаемом из сахарного тростника в Латинской Америке). Построены электромобили, использующие энергию аккумуляторов.

Хорошо известна роль лесов (в Республике Молдова они занимают лишь 9,6 % от всей территории) в снижении содержания углекислого газа в атмосфере. Поэтому леса, лесополосы, парки надо беречь, заботиться о них, вместо засохших деревьев высаживать молодые.

К тепловым машинам относятся и **холодильные машины** – холодильники, морозильники, кондиционеры и т.д., которые уменьшают температуру тел по сравнению с окружающей средой. Они широко используются в пищевой промышленности, транспорте, торговле – для сохранения продуктов, особенно скоропортящихся, в медицине – при хранении медикаментов и различных препаратов и т.д.

Холодильные машины используют в качестве хладагента вещества с общим названием фреоны – полифторхлоруглеводороды. Попадая в атмосферу, на больших высотах, они разрушают озоновый слой ( $O_3$ ).

Воздух со значительным количеством озона ядовит для человека. В то же время озон в слое воздуха на высотах от 11 до 48 км над поверхностью Земли очень важен для жизни, так как поглощает вредное ультрафиолетовое излучение Солнца. Излучение при большой интенсивности способствует заболеванию раком кожи, опасно для зрения (возникает катаракта), ослабляет иммунную систему человека, отрицательно воздействует на растительный мир и т.д.

Хлор из фреона играет роль катализатора, превращая озон ( $O_3$ ) в обычный кислород ( $O_2$ ). Продолжительность такого воздействия равна времени существования фреона в свободном состоянии. Для фреона-12 оно составляет 112 лет, для фреона-113 – 85 лет, для фреона-11 – 50 лет. Это заставляет ограничить и даже полностью исключить использование фреона, в первую очередь, из-за длительности его существования. Ведь еще долгое время после попадания в атмосферу фреон будет разрушать озоновый слой.

Охрана среды – глобальная проблема. Была принята Рамочная Конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата, подписанная Республикой Молдова 9 июня 1995 года. Она предусматривает реализацию конкретной программы по охране среды подписавшими Сторонами.

В 1985 году в Вене была принята Конвенция об Охране озонового слоя. В рамках Конвенции в 1987 году был подписан Монреальский Протокол по веществам, разруша-

ющим озоновый слой. Была разработана программа, предусматривающая постепенное уменьшение производства и использование фреонов, особенно долго сохраняющихся в свободном виде, вплоть до полного прекращения. Эта программа затем уточнялась на конференциях подписавших ее Сторон в Лондоне (1990 г.) и Копенгагене (1992 г.). В 1996 году Республика Молдова стала членом Венской Конвенции и Монреальского Протокола. Чтобы обратить внимание населения на важность этой проблемы, 16 сентября было объявлено международным Днем защиты озонового слоя.

Документ особой важности для защиты окружающей среды – Киотский Протокол, подписанный 160-ю странами в 1997 году, вступил в силу в 2004 году после его ратификации большинством государств, в том числе и Республикой Молдова. Протокол предусматривает снижение в период 2008–2012 гг. выброса газов, вызывающих парниковый эффект, на 5,2 % по сравнению с 1990 годом.

Надо осознавать, что проблема защиты окружающей среды в равной мере касается каждого из нас. Избегая потери тепла в хорошо подготовленных к зиме зданиях, экономя электроэнергию (отключая свет в помещениях, если там никого нет или достаточно солнечного света), мы уменьшаем расход топлива со всеми вытекающими последствиями. Защищая зеленые насаждения, высаживая новые, мы оставляем следующим поколениям среду, в которой возможно продолжение и процветание жизни на Земле.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что такое парниковый эффект?
2. Какие изменения он может вызвать в окружающей среде?
3. Как образуются кислотные дожди? Какие вредные воздействия они оказывают?
4. В чем состоит защитная роль озонового слоя для жизни на Земле?
5. Какие меры предпринимаются для защиты окружающей среды? Приведите примеры.

# ТЕСТЫ ДЛЯ ИТОВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

## РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:	
	а) Процесс, в котором ... состояние системы ... называется круговым процессом.	1 б.
	б) Количество теплоты, полученное системой, равно сумме ... и совершенной ею механической работы над ... .	1 б.
	в) КПД теплового двигателя равен отношению между ... и полученным от нагревателя количеством теплоты.	1 б.
2	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно:	
	а) Внутренняя энергия термодинамической системы определяется только ее параметрами и не зависит от предыдущего состояния. <input type="checkbox"/>	1 б.
	б) Работа идеального газа в круговом процессе равна нулю. <input type="checkbox"/>	1 б.
	в) Работа идеального газа в адиабатном процессе равна изменению его внутренней энергии, взятому с противоположным знаком. <input type="checkbox"/>	1 б.
Задания 3 и 4 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая И) или ложно (записывая Л) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая да или нет).		
3	Изменение давления при постоянном объеме не изменяет внутреннюю энергию одноатомного идеального газа, так как эта энергия определяется только числом молей газа и его температурой.	
	Ответ:	3 б.
утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .		
4	При адиабатном расширении идеального газа скорости его молекул уменьшаются, так как в таком процессе газ совершает отрицательную механическую работу.	
	Ответ:	3 б.
утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .		
5	При переходе термодинамической системы из состояния 1 в состояние 2 ее энергия изменяется на $\Delta U_{12} = 180$ Дж, а при переходе из состояния 2 в состояние 3 – на $\Delta U_{23} = -40$ Дж. Чему равно изменение внутренней энергии системы при ее переходе из состояния 3 в состояние 1?	2 б.
6	Газ, получив количество теплоты 910 Дж, совершил механическую работу в 260 Дж. Найдите изменение внутренней энергии газа.	2 б.

7	<b>Одноатомный идеальный газ перевели из состояния с параметрами <math>p_1 = 1,8 \cdot 10^5</math> Па, <math>V_1 = 4,5</math> л в состояние с параметрами <math>p_2 = 1,4 \cdot 10^5</math> Па, <math>V_2 = 6,5</math> л. На диаграмме (<math>p, V</math>) этот переход имеет вид отрезка прямой, соединяющей эти два состояния. Вычислите:</b>	
	а) совершенную газом механическую работу;	3 б.
	б) изменение внутренней энергии газа;	3 б.
	в) полученное количество теплоты.	2 б.
8	<b>Температура нагревателя теплового двигателя равна <math>+127^\circ\text{C}</math>, а холодильника – <math>+31^\circ\text{C}</math>. В течение одного цикла рабочее тело двигателя передало холодильнику количество теплоты, равное <math>1,14</math> кДж. Определите:</b>	
	а) КПД теплового двигателя;	3 б.
	б) количество теплоты, полученное холодильником от рабочего тела;	3 б.
	в) совершенную тепловым двигателем работу за один цикл.	2 б.

## ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места, чтобы следующие высказывания были верны:	
	а) Внутренняя энергия идеального газа зависит только от ...	1 б.
	б) Теплоемкость тела равна ... количества теплоты, переданного телу, к изменению его температуры.	1 б.
	в) Количество теплоты, полученное системой, равно сумме ... и механической работы, совершенной ею над внешними телами.	1 б.
2	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждения истинно, и „Л“, если утверждение ложно.	
	а) Работа идеального газа, совершаемая при изменении его объема, является функцией состояния. <input type="checkbox"/>	1 б.
	б) Количество теплоты, переданное системе в изотермическом процессе, равно изменению ее внутренней энергии. <input type="checkbox"/>	1 б.
	в) Коэффициент полезного действия теплового двигателя является величиной, характеризующей его производительность. <input type="checkbox"/>	1 б.
Задания 3 и 4 состоят из двух утверждений, соединенных союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или можно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).		
3	В изотермическом процессе термодинамическая система не получает теплоту, так как в процессе, происходящем при постоянной температуре, изменение внутренней энергии равно нулю.	
	<b>Ответ:</b>	3 б.
утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .		
4	Молярная теплоемкость при постоянном давлении больше молярной теплоемкости при постоянном объеме, так как в изобарном процессе часть полученной теплоты расходуется на выполнение механической работы.	
	<b>Ответ:</b>	3 б.
утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .		
5	Определите внутреннюю энергию 2 молей идеального одноатомного газа, находящегося при температуре 27°C.	
		2 б.

6	Некоторому газу сообщили количество теплоты, равное 1,5 кДж. Какую механическую работу совершил газ, если внутренняя энергия изменилась на 900 Дж?	2 б.
7	Под поршнем вертикального цилиндра находится $m = 2$ кг гелия. При сообщении газу 105 кДж теплоты его температура увеличилась на 10 К. Определите:	
	а) молярные теплоемкости гелия при постоянном давлении $C_p$ и постоянном объеме $C_v$ ;	3 б.
	б) изменение внутренней энергии газа;	3 б.
	в) механическую работу, совершенную газом при расширении.	2 б.
8	1 моль идеального одноатомного газа занимает объем $V_1 = 10$ л под давлением $p_1 = 100$ кПа. Нагреваясь, газ расширился при постоянном давлении до объема $V_2 = 30$ л, после чего его давление увеличилось в 2 раза при постоянном объеме. Определите:	
	а) температуру газа в начальном состоянии, в конце изобарного процесса и в конце изохорного;	3 б.
	б) механическую работу, совершенную газом;	3 б.
	в) изменение внутренней энергии газа;	3 б.
	г) количество теплоты, сообщенное газу.	2 б.

# ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

## 3.1\*

### СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Как известно (см. п. 1.3), твердые тела и газы представляют собой две крайности в пространственном распределении частиц. Если газообразное состояние характеризуется полной беспорядочностью в распределении частиц, то в твердых телах они расположены в кристаллических решетках идеально правильно (дальний порядок). Жидкое вещество занимает промежуточное положение между кристаллами и газами.

Повседневные наблюдения приводят нас к выводу, что

**жидкости характеризуются собственным объемом, но не имеют собственной формы, обладая свойством текучести.**

С точки зрения молекулярно-кинетической теории наличие собственного объема доказывает, что между молекулами жидкости существуют силы взаимного притяжения. Они много больше тех, что действуют между молекулами газа, но меньше сил притяжения между молекулами твердых тел.

Жидкости сохраняют свой объем. Средняя кинетическая энергия теплового движения молекул жидкости примерно равна абсолютной величине средней потенциальной энергии их взаимодействия (п. 1.3 и *рис. 1.3*). Поэтому тепловое движение может легко нарушить связи между молекулами. В результате они приобретают определенную свободу перемещения внутри жидкости, что и объясняет их текучесть и свойство принимать форму сосуда, в котором находятся.

Благодаря силам притяжения между молекулами, плотность жидкостей гораздо больше, чем газов. Как мы увидим далее (пар. 3.2, а), действие этих сил ведет к тому, что **жидкости практически несжимаемы.**

Жидкости всегда изотропны и внутри них не существуют анизотропные области, как в поликристаллах. Это означает, что в жидкостях отсутствует дальний порядок.



Так как молекулы жидкостей находятся очень близко друг от друга, то они взаимодействуют одновременно с несколькими соседними, то есть возникают связи, создающие определенный порядок в расположении ближайших молекул. Но из-за большой подвижности молекул он соблюдается на расстоянии не более двух–трех молекулярных слоев. В этом случае говорят, что в жидкостях существует **ближний порядок** в пространственном расположении молекул.

Размеры областей, в которых существует ближний порядок (2–3 молекулярных слоя) слишком малы, чтобы сохраняться неизменными. Средняя кинетическая энергия молекул достаточна для преодоления притяжения соседних молекул и для удаления из сферы их действия, но при этом они сразу попадают в сферу действия других, образуя новое временное состояние равновесия. Таким образом, ближний порядок появляется и исчезает непрерывно во всем объеме жидкости. Поэтому физические свойства жидкости одинаковы во всем объеме. Другими словами,

**жидкости всегда изотропны.**

Свойства жидкостей изменяются при изменении внешних условий, особенно температуры. При низких температурах степень упорядоченности молекул жидкости растет и ее структура становится все более сходной со структурой твердых тел. И наоборот, при высоких температурах ближний порядок нарушается и при достаточно больших ее значениях жидкость переходит в газообразное состояние.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какой вы представляете внутреннюю структуру жидкостей?
2. Охарактеризуйте понятие «ближний порядок».
3. Перечислите основные свойства жидкостей.
4. Как изменяется внутренняя структура жидкостей при низких температурах? А при высоких температурах?

### 3.2\*

## ПОВЕРХНОСТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Свойство текучести жидкостей приводит к существованию различной формы свободной поверхности раздела между средами: жидкость–твердое тело, жидкость–жидкость, жидкость–газ. Именно благодаря этой поверхности раздела жидкости характеризуются качественно новыми явлениями, называемыми **поверхностными**. Они являются прямым следствием действия сил притяжения между молекулами жидкости из поверхности раздела и ее внутренних слоев или из других сред.

### а. Поверхностный слой. Поверхностное натяжение

Пусть имеется жидкость, свободная поверхность которой отделяет ее от газобразной среды. Рассмотрим действие сил притяжения между молекулами. Извест-

но, что силы притяжения между молекулами проявляются только на малых расстояниях, с радиусом молекулярного действия  $r_m \sim 10^{-9}$  м (п. 1.3). Между молекулами, центры которых находятся на расстоянии  $d$  от поверхности жидкости большем, чем радиус молекулярного действия  $r_m$ , действуют силы притяжения.

Их равнодействующая для любой молекулы (например, *A* или *D*, рис. 3.1) всегда равна нулю, так как молекула притягивается одинаково во всех направлениях ко всем другим, находящимся в сфере ее действия.

Пусть теперь молекула жидкости находится на поверхности жидкости (молекула *B*, рис. 3.1). На нее действуют как силы притяжения молекул жидкости, так и силы притяжения молекул газа. Очевидно, равнодействующая сил притяжения молекул жидкости  $F_{ж}$  во много раз больше результирующей сил притяжения молекул газа  $F_{г}$ , так как в сфере действия молекулы *B* число молекул газа значительно меньше, чем молекул жидкости. В итоге на нее действует равнодействующая сил, направленная внутрь жидкости, равная по модулю  $F_{в} = F_{ж} - F_{г} \approx F_{ж}$  и перпендикулярная поверхности жидкости.

На молекулы, находящиеся под свободной поверхностью жидкости на расстоянии  $d$ , меньшем радиуса молекулярного действия  $r_m$ , тоже действует сила  $F_{в}$ , направленная внутрь жидкости, но меньшая по модулю. Действительно, для молекулы *C* (рис. 3.1) часть сил притяжения молекул жидкости взаимно компенсируется и равнодействующая  $F_{в}$  становится меньше. Когда сфера молекулярного действия окажется полностью в жидкости, то есть  $d \geq r_m$ , тогда равнодействующая сила  $F_{ж}$  станет равной нулю.

Итак, все молекулы, находящиеся на поверхности жидкости в слое толщиной, равной радиусу молекулярного действия, втягиваются внутрь нее. Этот слой называется **поверхностным слоем**.

Благодаря ему в жидкостях создается давление, называемое внутренним или молекулярным. Под действием этого давления молекулы жидкости сближаются до тех пор, пока силы отталкивания не уравновесят сил сжатия, созданных поверхностным слоем.

Отметим, что внутреннее давление не действует на тела, погруженные в жидкость. В самом деле, между телом и жидкостью образуется поверхностный слой, в котором внутренние силы направлены от тела внутрь жидкости.

Так как силы притяжения молекул жидкости велики, то поверхностный слой создает огромное давление внутри жидкости. Например, поверхностный слой воды создает внутреннее давление, примерно равное  $1\,079$  МПа  $\approx 11\,000$  атм! Теперь ясно, почему жидкости практически несжимаемы. Для заметного сжатия жидкости нужно оказывать на нее давление, сопоставимое с внутренним давлением, создаваемым поверхностным слоем.

Предположим, что под действием молекулярных сил молекула из поверхностного слоя перемещена в глубь жидкости. Для этого была совершена механическая работа

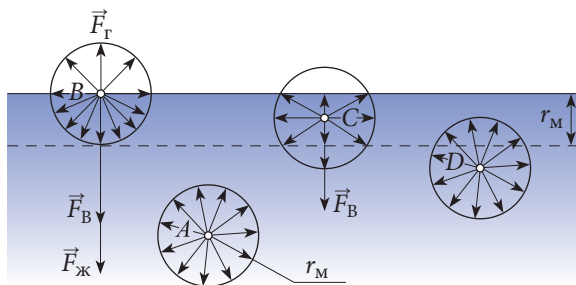


Рис. 3.1

$A_n > 0$ , а свободная поверхность жидкости уменьшилась, то есть  $\Delta S < 0$ . Если мы хотим увеличить свободную поверхность ( $\Delta S > 0$ ), необходимо вывести из жидкости молекулы в поверхностный слой, то есть совершить работу против молекулярных сил ( $A_n < 0$ ). Итак, совершенная механическая работа молекулярных сил пропорциональна изменению площади свободной поверхности жидкости:

$$A_n = -\sigma \Delta S, \quad (3.1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент **поверхностного натяжения**, зависящий от природы жидкости и ее температуры. Знак “–” в (3.1) показывает, что при совершении молекулярными силами положительной работы площадь свободной поверхности жидкости уменьшается.

Из (3.1) следует:

$$\sigma = \frac{A_n}{|\Delta S|}. \quad (3.2)$$

Коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе, необходимой для изменения площади свободной поверхности жидкости на единицу. В СИ:

$$[\sigma] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Молекулы из поверхностного слоя обладают большей потенциальной энергией, чем молекулы внутри жидкости. Действительно, из механики нам известно, что каждое тело, поднятое на некоторую высоту, обладает дополнительной потенциальной энергией. Если молекула перемещается из глубины жидкости в поверхностный слой, ее потенциальная энергия растет. Избыток дополнительной потенциальной энергии представляет собой потенциальную энергию поверхностного слоя  $E_{\text{пн}}$ . Именно за счет этой энергии совершается механическая работа  $A_n$  по перемещению молекул в глубь жидкости. Используя соотношение между механической работой и изменением потенциальной энергии, запишем:  $A_n = -\Delta E_{\text{пн}}$ . Применив формулу (3.1), получим:

$$\Delta E_{\text{пн}} = \sigma \Delta S. \quad (3.3)$$

Известно, что любая система стремится перейти в состояние с минимальной потенциальной энергией. Тогда из (3.3) следует, что площадь свободной поверхности жидкости стремится стать наименьшей. Из геометрии известно, что для данного объема тело с минимальной поверхностью – шар. То есть при отсутствии или малости внешних сил жидкость принимает сферическую форму. Действительно, маленькие капельки воды имеют, приблизительно, сферическую форму.

Стремление жидкости уменьшить площадь свободной поверхности приводит к возникновению на этой поверхности силы, ориентированной вдоль нее. В самом деле, молекулы на свободной поверхности взаимодействуют не только с молекулами внутри жидкости, но и между собой. На рисунке 3.2 показана такая свободная поверхность жидкости в цилиндрическом сосуде (стакане, например), вид сверху. Для молекулы А равнодействующая молекулярных сил, направленных вдоль поверхности жидкости, равна нулю. Но для любой молекулы у края поверхности (напри-

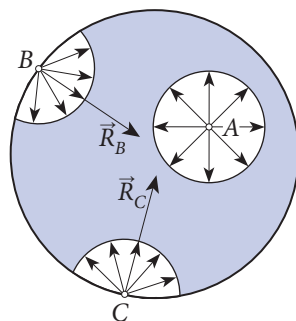


Рис. 3.2

мер,  $B$ ,  $C$ ) эта равнодействующая ( $\vec{R}_B, \vec{R}_C$ ) отлична от нуля. Итак, молекулярные силы, направленные по касательной к поверхности жидкости, действуют на любой замкнутый контур, ограничивающий эту поверхность, перпендикулярно ему. Их называют **силами поверхностного натяжения**. Наличие этих сил можно наблюдать с помощью глицеринового раствора (вода, мыло, сахар, глицерин). По диаметру проволочного кольца привязывается нитка. Опустим кольцо в раствор и, вытащив его, увидим, что нитка свободно, в ненатянутом состоянии, расположится на жидкой пленке, затянувшей кольцо (рис. 3.3, а), так как поверхностные силы уравниваются. Прорвем пленку справа от нитки, тогда силы поверхностного натяжения уменьшат площадь оставшейся поверхности, натянув нитку (рис. 3.3, б).

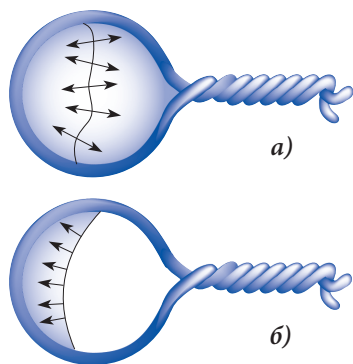


Рис. 3.3

Докажем, что сила поверхностного натяжения пропорциональна длине контура, ограничивающего свободную поверхность жидкости. Для этого рассмотрим поведение пленки (рис. 3.4, а), затянувшей прямоугольную рамку с одной подвижной стороной длиной  $l$ . Несмотря на то, что пленка очень тонкая, ее толщина во много раз больше диаметра одной молекулы. Поэтому она представляет собой объем жидкости, ограниченный двумя одинаковыми свободными поверхностями, вдоль которых действуют поверхностные силы (рис. 3.4, б).

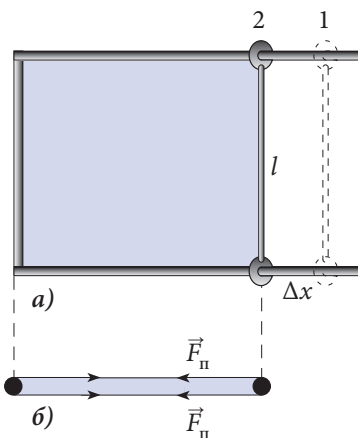


Рис. 3.4

Под действием внутренних сил часть молекул из поверхностного слоя втягивается внутрь пленки, и обе поверхности после перемещения подвижной стороны на  $\Delta x$  становятся меньше. Согласно (3.1) совершенная механическая работа  $A_n = -\sigma \cdot 2\Delta S$ . После перемещения подвижной стороны  $l$  на расстояние  $\Delta x$  свободная поверхность пленки уменьшается и тогда  $\Delta S = -l\Delta x$ . Итак,  $A_n = 2\sigma l\Delta x$ .

Эту механическую работу можно выразить и через силы поверхностного натяжения, действующие на расстоянии  $\Delta x$ :  $A_n = 2F_n\Delta x$ . После сокращения на  $2\Delta x$  в предыдущих выражениях для работы  $A_n$ , получим:

$$F_n = \sigma l, \quad (3.4)$$

откуда

$$\sigma = \frac{F_n}{l}. \quad (3.5)$$

Коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  численно равен силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины границы свободной поверхности жидкости.

Итак, поверхностный слой жидкости всегда находится в состоянии натяжения. Но будет ошибкой сравнивать свободную поверхность жидкости с растянутой упругой

пленкой – силы упругости растут с увеличением площади пленки, а силы поверхностного натяжения не зависят от площади поверхности жидкости, так как число молекул на единицу площади поверхности жидкости постоянно.

## Лабораторная работа\*

### ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

<b>Цель работы:</b>	Определение коэффициента поверхностного натяжения с помощью отрыва каплей.
<b>Приборы и материалы:</b>	весы с разновесами, микрометр (штангенциркуль), воронка, стеклянная трубка (диаметром 3–6 мм) с краником, соединенные между собой резиновыми трубками, стакан для сбора капель, штатив с лапкой, клин из мягкого дерева (ель).

#### Краткая теория:

Отрыв капли жидкости от стеклянной трубки наблюдается тогда, когда ее сила тяжести  $G$  станет равной силе поверхностного натяжения  $F_n$  (3.4), то есть  $\sigma l = mg$ , где  $m$  – масса капли,  $g$  – ускорение свободного падения, а  $l$  – длина контура свободной поверхности жидкости в момент ее отрыва. Так как  $l \approx \pi D$ , где  $D$  – внутренний диаметр трубки, то для коэффициента поверхностного натяжения получим:  $\sigma = \frac{mg}{\pi D}$ .

Так как массу одной капли очень трудно измерить точно, находится масса  $M$  у достаточно большого числа  $n$  капель. Тогда  $m = M/n$  и для коэффициента поверхностного натяжения имеем:  $\sigma = \frac{Mg}{n\pi D}$ .

#### Ход работы:

1. Измерьте внутренний диаметр стеклянной трубки, от которой будут отрываться капли воды. Для этого введите деревянный клин в трубку и заметьте, до какой глубины он войдет в трубку, затем измерьте микрометром (штангенциркулем) диаметр клина в этом месте.
2. Соберите установку по рисунку 3.5.
3. Закройте кран и налейте жидкость в воронку.

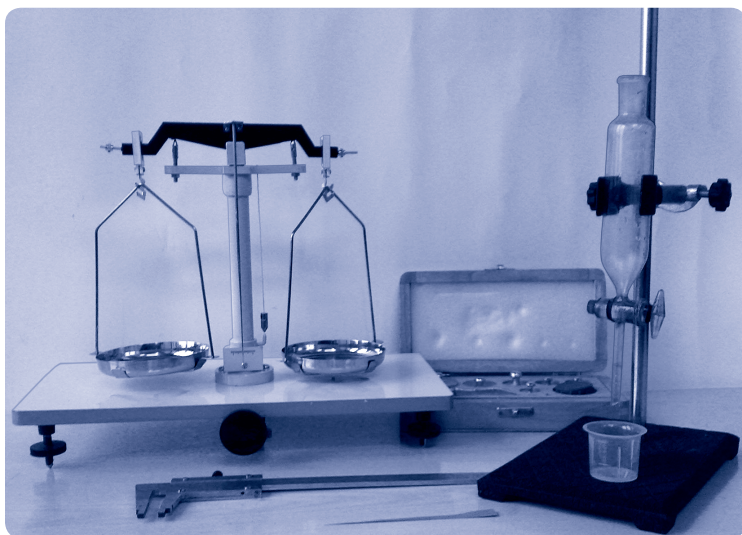


Рис. 3.5

4. Откройте кран так, чтобы в минуту капало 30-50 капель. В этом случае будем считать, что капли отрываются только под действием силы тяжести.
5. Взвесьте на весах (как можно точнее) стакан для сбора капель ( $m_1$ ).
6. Подставьте стакан под стеклянную трубку и отсчитайте в него 60 капель.
7. Взвесьте стакан с собранной водой ( $m_2$ ) и определите массу жидкости  $M = m_2 - m_1$ .
8. Повторите опыт, собрав 90 и соответственно 120 капель.
9. Заполните таблицу.

№ опыта	$D$ (мм)	$m_1$ (г)	$m_2$ (г)	$M$ (г)	$n$	$\sigma$ (Н/м)	$\sigma$ (Н/м)
1.					60		
2.					90		
3.					120		

10. Вычислите абсолютную и относительную погрешности, допущенные при измерении коэффициента поверхностного натяжения с помощью формул:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta D}{D}, \quad \Delta \bar{\sigma} = \bar{\sigma} \cdot \varepsilon.$$

11. Выразите полученный результат в виде:

$$\sigma = (\sigma \pm \Delta \sigma) \frac{H}{M}; \quad \varepsilon = \dots \%$$

12. Сделайте вывод относительно полученных результатов.

## ВОПРОСЫ

1. Каков физический смысл коэффициента поверхностного натяжения?
2. Выведите формулу для нахождения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капель.
3. Почему капли должны отрываться как можно медленнее?

## б. Форма поверхностного слоя. Капиллярные явления

При контакте жидкости с твердыми телами наряду с силами взаимодействия между молекулами жидкости  $F_{\text{ж}}$  нужно учесть и силы взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел  $F_{\text{жт}}$ . В зависимости от соотношения этих сил жидкость смачивает или не смачивает твердое тело. Например, вода смачивает стекло, но не смачивает парафин. Ртуть не смачивает стекло (проследите перемещение столбика ртути в термометре), но смачивает металлы.

Итак, рассмотрим две ситуации:

- 1)  $F_{\text{жт}} > F_{\text{ж}}$  – жидкость смачивает твердое тело;
- 2)  $F_{\text{жт}} < F_{\text{ж}}$  – жидкость не смачивает твердое тело.

В зависимости от направления равнодействующей сил  $F_{\text{жт}}$  и  $F_{\text{ж}}$  поверхностный слой жидкости изгибается в виде *вогнутого* ( $F_{\text{жт}} > F_{\text{ж}}$ ) или *выпуклого* ( $F_{\text{жт}} < F_{\text{ж}}$ ) **мениска**

(от греч. *meniskos* – лунный серп, выпуклость). Если масса жидкости велика, то под действием силы тяжести почти вся ее поверхность будет горизонтальной, только в месте контакта с твердым телом будет наблюдаться мениск.

Рассмотрим как образуется мениск и какой будет его форма в приведенных выше двух случаях. Проанализируем действие межмолекулярных сил на молекулу на поверхности жидкости вблизи стенки сосуда. Сфера молекулярного действия в этом случае охватывает все три среды так, что половина находится в твердом теле и по четверти в жидкости и газе (рис. 3.6) (положение молекулы показано до образования мениска). Так как силы взаимодействия молекул жидкости с молекулами газа  $\vec{F}_{жг}$  очень малы, то ими можно пренебречь по сравнению с силами  $\vec{F}_{жт}$  и  $\vec{F}_{ж}$  и на рисунке 3.6 они не показаны.

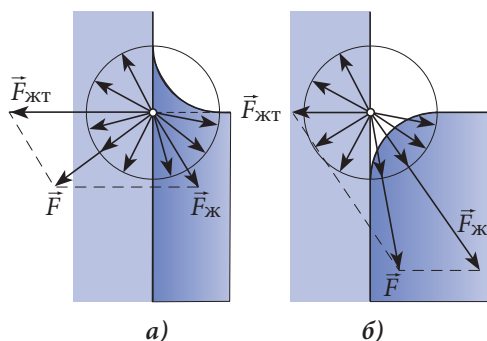


Рис. 3.6

Сила  $\vec{F}_{жт}$  перпендикулярна стенке сосуда, а  $\vec{F}_{ж}$  направлена в глубь жидкости. Сложив силы  $\vec{F}_{жт}$  и  $\vec{F}_{ж}$  получим их результирующую  $\vec{F}$ , перпендикулярную свободной поверхности жидкости. Итак, если  $F_{жт} > F_{ж}$  (рис. 3.6, а), результирующая  $\vec{F}$  направлена в сторону от жидкости и мениск вогнутый. Если  $F_{жт} < F_{ж}$  (рис. 3.6, б), результирующая  $\vec{F}$  направлена в глубь жидкости и мениск выпуклый.

Если сила тяжести жидкости сравнима с силой поверхностного натяжения, то вся свободная поверхность жидкости имеет форму мениска. Это возможно, когда жидкость находится в очень тонких сосудах (трубках, трещинах и др.), называемых **капиллярами** (от лат. *capillaris* – волосной). Трубки диаметром не более 1 мм называются **капиллярными трубками**.

Благодаря существованию больших поверхностных сил, изогнутая свободная поверхность (вогнутая или выпуклая) действует на жидкость с дополнительным давлением, направленным к центру кривизны поверхности. Если мениск вогнутый, дополнительное давление действует в направлении, противоположном внутреннему, и жидкость поднимается на высоту  $h$  (рис. 3.7, а). В случае выпуклого мениска дополнительное и внутреннее давления действуют в одинаковом направлении и жидкость опускается на  $h$  (рис. 3.7, б).

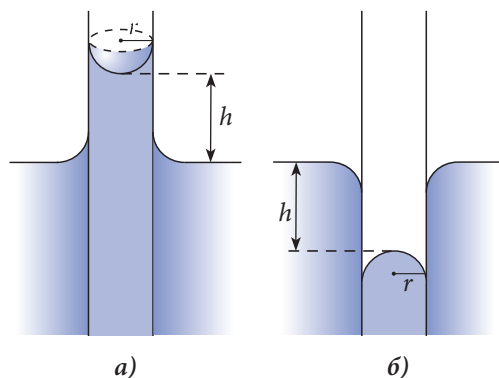


Рис. 3.7

Высота  $h$  определяется из условия равновесия жидкости в капиллярной трубке. В этом случае результирующая сил поверхностного натяжения  $F_n$  равна силе тяжести  $G$  столба жидкости в капилляре, то есть:

$$F_n = G. \quad (3.6)$$

Результирующая  $F_{\pi}$  определяется с помощью выражения (3.4), в котором длина контура, ограничивающего свободную поверхность жидкости,  $l = 2\pi r$ , то есть  $F_{\pi} = \sigma l = 2\pi r\sigma$ , а сила тяжести жидкости  $G = mg = \rho Vg = \rho\pi r^2hg$ , где  $\rho$  – плотность жидкости, а  $r$  – радиус капиллярной трубки.

Из условия равновесия (3.6) получаем:

$$\rho gh\pi r^2 = 2\pi r\sigma,$$

откуда 
$$h = \frac{2\sigma}{\rho gr}. \quad (3.7)$$

Это выражение известно под названием **формулы Жюрена**:

**Высота, на которую поднимается смачивающая жидкость (опускается несмачивающая) в капилляре, обратно пропорциональна его радиусу.**

Так, питательные вещества растений поднимаются по капиллярным сосудам, вода из почвы подымается по стенкам здания, если не сделать хорошую изоляцию оснований, и т.д.

### Пример решения задачи

1

**Дано:**

$r = 1$  мкм,  
 $R = 3$  мм,  
 $\sigma = 0,072$  Н/м

**СИ:**

$10^{-6}$  м,  
 $3 \cdot 10^{-3}$  м

Определите энергию, выделяющуюся в процессе слияния капелек воды радиусом  $r = 1$  мкм в одну каплю радиусом  $3$  мм. Коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 0,072$  Н/м. Силой тяжести пренебречь.

$\Delta E - ?$

Дж

### Решение

При слиянии маленьких капелек в одну большую изменяется площадь поверхности воды и согласно (3.3) изменяется потенциальная энергия поверхностного слоя. Предположим, что есть  $N$  маленьких капелек. Это число можно определить из равенства объемов воды в двух состояниях:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot N = \frac{4}{3}\pi R^3, \text{ откуда следует: } N = \left(\frac{R}{r}\right)^3.$$

Площадь поверхности воды из  $N$  маленьких капелек равна:

$$S_r = 4\pi r^2 \cdot N = 4\pi \frac{R^3}{r},$$

а у большой капли  $S_R = 4\pi R^2$ . Видно, что  $S_r > S_R$  и

$$|\Delta S| = S_r - S_R = 4\pi R^2 \left(\frac{R}{r} - 1\right). \quad (3.8)$$

Итак, площадь поверхности воды уменьшается во время слияния капелек и соответственно уменьшается потенциальная энергия  $\Delta E$ , то есть энергия выделяется. Подставив (3.8) в (3.3), получим:

$$\Delta E = \sigma|\Delta S| = 4\pi\sigma R^2 \left(\frac{R}{r} - 1\right); \quad \Delta E \approx 0,024 \text{ Дж.}$$



**Дано:**

$$\sigma = 0,072 \text{ Н/м,}$$

$$\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$d_{\text{max}} - ?$$

На поверхность воды положили смазанную жиром стальную иглу (вода не смачивает иглу). При каком максимальном диаметре иглы она еще не будет тонуть? Плотность стали  $\rho = 7,85 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент поверхностного натяжения воды  $\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$ , ускорение свободного падения  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

**Решение**

Для того, чтобы игла удерживалась на поверхности воды, давление, оказываемое ею на эту поверхность, должно быть меньше или равно добавочному давлению  $p_2$ , которое создает изогнутая поверхность жидкости под иглой, направленному к центру кривизны.

Давление, которое оказывает игла на воду, равно:

$$p_1 = \frac{mg}{S} = \frac{\rho V \cdot g}{ld} = \frac{\rho gl \frac{\pi d^2}{4}}{ld} = \frac{\pi \rho g d}{4},$$

где  $d, l, V$  – это диаметр, длина и объем нити, соответственно, а  $\rho$  – плотность стали.

Добавочное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости под иглой, определяется так:

$$p_2 = \frac{F_n}{S} = \frac{\sigma \cdot 2l}{ld} = \frac{2\sigma}{d},$$

где  $\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$  – это коэффициент поверхностного натяжения воды. При записи выражения для добавочного давления мы пренебрегли диаметром иглы по сравнению с ее длиной  $2(l + d) \approx 2l$ .

Игла не будет тонуть, если  $p_1 \leq p_2$ , т.е.

$$\frac{\pi \rho g d}{4} \leq \frac{2\sigma}{d},$$

Максимальный диаметр получим из равенства этих давлений. Таким образом,

$$d_{\text{max}} = \sqrt{\frac{8\sigma}{\pi \rho g}}; d_{\text{max}} = 1,5 \text{ мм.}$$

**ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

1. Что представляют из себя силы  $F_{\text{жт}}, F_{\text{жг}}, F_{\text{ж}}$ ?
2. Что называется поверхностным слоем и как он действует на жидкость?
3. Что представляют собой силы поверхностного натяжения и как они действуют?
4. Дайте определение коэффициенту поверхностного натяжения. В чем он измеряется в СИ?
5. Каковы условия смачивания и несмачивания жидкостями твердых тел? Приведите примеры.
6. Как объясняется образование мениска при контакте жидкости с твердым телом?
7. Запишите формулу Жюрена. От каких факторов зависит подъем или опускание жидкостей в капиллярных трубках?

8. Какую работу надо совершить против сил поверхностного натяжения для увеличения поверхности мыльного пузыря на  $10 \text{ см}^2$ ? Дано  $\sigma = 0,025 \text{ Н/м}$ .
9. Насколько возрастет энергия поверхностного слоя мыльной пленки, если площадь поверхности возрастет на  $25 \text{ см}^2$ ?
10. Определите коэффициент поверхностного натяжения жидкости, если известно, что в капилляре радиусом  $0,2 \text{ мм}$  жидкость поднялась на  $2,75 \text{ см}$ . Плотность жидкости равна  $800 \text{ кг/м}^3$ , ускорение свободного падения  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .
11. В капиллярной трубке, находящейся на поверхности Земли, вода поднимается на  $30 \text{ мм}$ . На какую высоту подыметса вода в этой трубке на поверхности Луны? Известно, что ускорение свободного падения на Земле в 6 раз больше, чем на Луне.

### 3.3\*

## СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

После анализа соотношений между силами притяжения и отталкивания, а также между кинетической и потенциальной энергиями взаимодействия молекул в п. 1.3 мы ознакомились с молекулярно-кинетическими моделями агрегатных состояний вещества. Согласно этим моделям твердое состояние отличается от жидкого и газообразного тем, что имеет собственные форму и объем. Напомним, что это следствие очень малого значения кинетической энергии молекул по сравнению с абсолютным значением их потенциальной энергии взаимодействия, поэтому молекула не может покинуть потенциальную яму (рис. 1.3). Иными словами, межмолекулярные силы настолько велики, что молекулы вещества не могут покинуть строго определенные положения равновесия, совершая возле них только колебательные движения.

### а. Кристаллы

При внешнем осмотре твердых веществ видно, что в природе существует много твердых тел с гладкими плоскими гранями со строго определенными углами между ними. Такие твердые тела называются **кристаллами**. Например, кристаллы поваренной соли имеют форму куба, льда – шестигранной призмы, кварца – октаэдра и т.д.

Исследования кристаллов с помощью рентгеновских лучей показали, что они характеризуются внутренней упорядоченной структурой составляющих частиц, то есть образуют **кристаллическую** или **пространственную решетку**. Точки решетки, соответствующие положениям устойчивого равновесия частиц, называются **узлами** решетки. На рисунке 3.8 представлена кристаллическая решетка, составленная из двух категорий частиц, находящихся в узлах решетки. Видно, что выбранный узел повторяется в решетке в различных направлениях с разными периодами (расстояниями): в направлении 1–1 с периодом  $a$ ; в направлении 1–2 – с периодом  $b$ ; в направлении 1–3 – с периодом  $c$  и т.д. Упорядоченное расположение частиц в узлах решетки с периодической многократной повторяемостью называется **дальним порядком**. Дальний

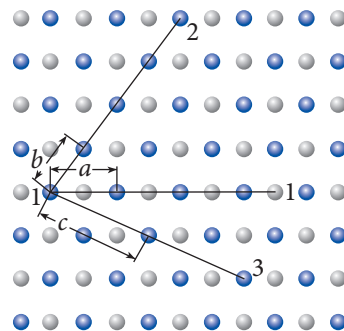


Рис. 3.8

порядок в кристалле делает возможным выделение структурной единицы кристаллической решетки, которая, будучи перемещена с определенным периодом вдоль осей пространственной системы координат, “построит” точную копию решетки изучаемого твердого вещества. Эта структурная единица называется **элементарной ячейкой**. Форма, размеры и порядок размещения частиц в элементарной ячейке определяют структуру кристалла в целом.

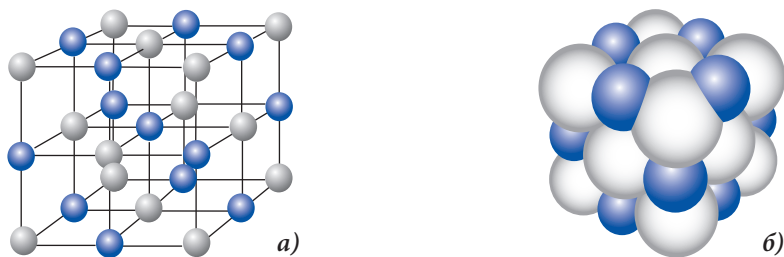


Рис. 3.9

На рисунке 3.9 схематически представлена кристаллическая решетка поваренной соли (а) и пространственное размещение ионов  $\text{Na}^+$  (темные шарики) и  $\text{Cl}^-$  (светлые шарики) (б). Видно, что каждый ион хлора окружен шестью ионами натрия и, наоборот, – каждый ион натрия – шестью ионами хлора. В этом случае говорят, что имеется **гранецентрированная кубическая решетка**. Ее элементарная ячейка представляет собой куб, в вершинах которого и в центрах граней находятся ионы одного знака, а на серединах ребер и в центре куба – ионы противоположного знака.

Кристаллические решетки могут быть различной формы, но не любой. В идеальном кристалле элементарные ячейки примыкают друг к другу, не образуя пустот. Только в этом случае выполняется условие устойчивого равновесия частиц – силы притяжения и отталкивания между ними уравниваются и потенциальная энергия взаимодействия достигает минимума.

Благодаря дальнему порядку кристаллам свойственна симметрия.

**Симметрия – это свойство кристаллов совмещаться самим с собой при некоторых геометрических операциях.**

Нам уже известно, что при параллельном перемещении (трансляции) элементарной ячейки получается кристаллическая решетка. В этих случаях говорят, что кристалл обладает **трансляционной симметрией**. Существуют и другие геометрические операции, при которых не изменяется кристаллическая решетка (совмещается сама с собой): вращения вокруг определенных осей, отражение от некоторых плоскостей и т.д.

Исключительно важное свойство кристаллов – **анизотропия**, зависимость физических свойств кристалла от направления. Это объясняется тем, что в кристаллической решетке на единицу длины в разных направлениях приходится разное количество частиц. Действительно, из рисунка 3.8 видно, что в направлении 1–1 есть 8 частиц, в направлении же 1–2 и 1–3 частицы расположены реже. Но если в разных направлениях решетки плотность частиц различна, то эти направления отличаются многими

физическими свойствами. Например, у всех кристаллов есть анизотропия механической прочности. При дроблении они легче раскалываются по направлениям, вдоль которых механическая прочность меньше. Анизотропия механической прочности очень сильно проявляется у кристаллов графита, где атомы углерода расположены слоями, на расстоянии в 2,5 раза большем, чем расстояние между атомами в каждом слое, поэтому слои легко скользят один по другому. Это свойство графита мы используем, когда пишем карандашом.

Из практики известно, что многие кристаллические вещества не обладают анизотропией. В связи с этим кристаллы делят на две большие группы: **монокристаллы** и **поликристаллы**. Монокристаллы имеют во всем объеме единую кристаллическую решетку. Они обладают и симметрией, и анизотропией. Поликристаллы состоят из множества мелких, беспорядочно ориентированных монокристаллов. Каждый из монокристаллов анизотропен, а вот поликристалл изотропен, то есть его свойства одинаковы во всех направлениях.

Благодаря своим механическим, тепловым, электрическим, магнитным и оптическим свойствам кристаллы широко применяются в науке и технике. Например, алмаз, известный как самый твердый на Земле материал, используется для обработки твердых тел. Он применяется при создании высокоточных механических приборов. Благодаря своим замечательным электрическим свойствам в электротехнике и электронике используются кварц, слюда, германий, кремний. В различных оптических устройствах применяют турмалин, флюорит, исландский шпат, рубин и др.

## 6. Аморфные тела

Жидкость можно мысленно разделить на множество очень маленьких объемов, в каждом из которых молекулы распределены сравнительно упорядоченно, как в кристаллах. Этот “порядок” очень нестабилен, непрерывно нарушается и вновь создается. Структуру жидкости поэтому называют **квазикристаллической**. В определенных условиях иногда жидкости очень близки к твердому состоянию и, наоборот, твердые тела напоминают жидкости. Тела, имеющие собственный объем и форму, у которых существует только ближний порядок в расположении молекул, нет кристаллической решетки, называют аморфными. Стекло, канифоль, смола, воск, пластмассы и др. – вещества в аморфном состоянии. Бывает, что одно и то же вещество может находиться как в кристаллическом состоянии (есть дальний порядок), так и в аморфном (ближний порядок в расположении молекул). На *рисунке 3.10* показана структура кремния ( $\text{SiO}_2$ ): а) в кристаллическом состоянии – кварц и б) в аморфном – кварцевое стекло. Видно, что в обоих случаях атом кремния (темный шарик) окружен тремя атомами кислорода (светлые шарики), расположенными симметрично, но связь между ними различна: в случае кварца существует дальний порядок, а в кварцевом стекле – только ближний.

Внутренняя структура аморфных тел отличается от жидкостей меньшими расстояниями между молекулами и большими силами притяжения. Поэтому кинетическая энергия молекул в аморфном состоянии меньше, чем в жидком. Для превращения аморфного тела в жидкость необходимо увеличить кинетическую энергию молекул, то есть повысить температуру. Поэтому аморфные тела называют еще **переохлажденными жидкостями** или жидкостями с очень низкой текучестью.

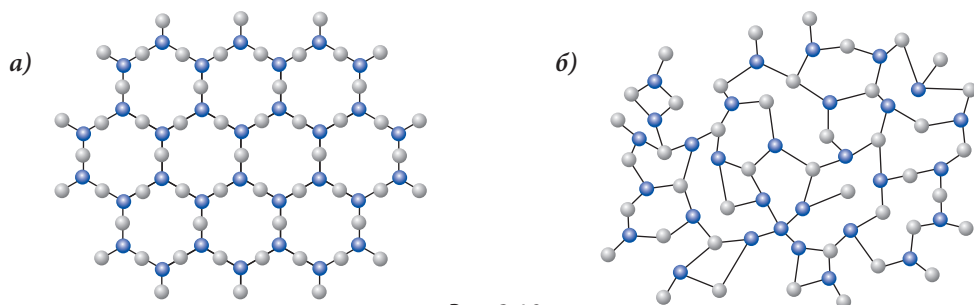


Рис. 3.10

Аморфные тела изотропны, их физические свойства одинаковы во всех направлениях. Если кусок стекла покрыть тонким слоем воска и коснуться горячим предметом его поверхности в одной точке, то расплавившийся воск образует кружок. Значит, теплопроводность стекла одинакова во всех направлениях.

### в. Жидкие кристаллы

Большинство веществ может находиться в одном из трех известных агрегатных состояний: твердом, жидком или газообразном. Однако, существуют вещества, которые могут находиться в состоянии, промежуточном между жидким и твердым, и которые обладают одновременно свойствами как кристаллов, так и жидкостей. Такие вещества называются **жидкими кристаллами** или **кристаллическими жидкостями**.

О существовании жидких кристаллов стало известно еще в 1888 году, когда австрийский ботаник и химик Фредерик Рейнитцер (1857–1927) провел исследование кристаллов органического вещества, синтезированного из моркови. Он обнаружил, что эти кристаллы имеют две температуры плавления и, соответственно, два жидких состояния, мутное и прозрачное. Именно мутное жидкое состояние представляет собой то, что позднее было названо жидким кристаллом. Теоретические и экспериментальные исследования структуры и физических свойств жидких кристаллов показали, что они образованы молекулами различной геометрической формы (в большинстве случаев это стержни и диски). В кристаллической жидкости всегда существует определенное направление, обусловленное межмолекулярными силами, вдоль которого ориентируются большие оси молекул (рис. 3.11, а) или нормаль к их поверхности (рис. 3.11, б).

Жидкие кристаллы делятся на три большие группы: **нематики** (от греческого *νημα* – нить), **смектики** (от греческого *σμεγμα* – мыло) и **холестерики**.

В жидких кристаллах нематического типа молекулы практически параллельны друг другу, а центры масс разбросаны хаотически (рис. 3.12, а). Поэтому в нематических кристаллических жидкостях отсутствует дальний порядок и более выражено свойство текучести.

В жидких кристаллах смектического типа (рис. 3.12, б) центры масс молекул

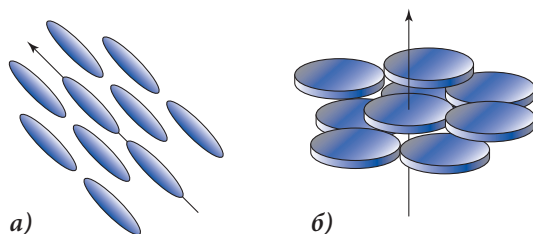


Рис. 3.11

расположены в эквидистантных плоскостях, образующих смектические слои, которые могут легко скользить друг относительно друга. Внутри слоев молекулы расположены таким образом, что их большие оси параллельны нормали к слою или образуют различные углы с ним. Поскольку в слоях существует дальний порядок, то эти жидкие кристаллы анизотропны и обладают большой вязкостью.

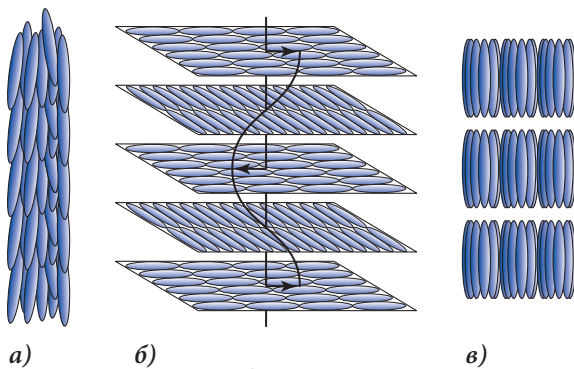


Рис. 3.12

В холестерических жидких кристаллах (рис. 3.12, в) молекулы расположены в слоях, скрученных в спираль. В каждом слое молекулы упорядочены как в нематических кристаллических жидкостях, а структура слоев похожа на жидкие смектические кристаллы.

Было установлено, что расположение молекул в кристаллических жидкостях изменяется под действием различных внешних факторов, таких, как температура, давление, электрическое и магнитное поля. В результате изменяются оптические свойства жидких кристаллов (цвет, прозрачность и т.д.). Эти особенности поведения жидких кристаллов открыли путь многочисленным применениям последних.

Одним из первых применений жидких кристаллов было создание в 60-х годах прошлого века индикаторов, используемых в наручных часах и карманных калькуляторах.

В настоящее время жидкие кристаллы широко используются. Благодаря чувствительности к изменению температуры они широко применяются в электронике и медицине. На транзисторы, интегральные цепи и другие электронные элементы приклеивают пленки жидких кристаллов. Перегретые или холодные элементы (то есть неработающие) моментально обнаруживаются по яркому цвету этих пленок. Жидкокристаллический индикатор, приклеенный к телу больного, показывает наличие воспалений или внутренних опухолей. Жидкие кристаллы используются и для обнаружения вредных испарений химических соединений, различных, опасных для человека, излучений.

Сравнительно новой и очень важной областью применения жидких кристаллов является информационная техника. Уже широко используются телевизоры и цветные мониторы LCD (жидкокристаллический дисплей). Они дают гораздо более качественное изображение и потребляют меньше энергии. Продемонстрирована возможность получения с помощью жидких кристаллов стереоизображений, то есть недалеко то время, когда появятся стереотелевизоры.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что представляет собой кристаллическая решетка? А ее узлы?
2. Охарактеризуйте понятие "дальний порядок". Какие свойства кристаллов являются следствием существования дальнего порядка?

3. Что представляет собой элементарная ячейка?
4. Что такое монокристаллы? А поликристаллы? Чем они отличаются?
5. Приведите примеры применения кристаллов.
6. Какие тела называются аморфными?
7. Что представляет собой внутренняя структура аморфных тел?
8. Почему аморфные тела называют переохлажденными жидкостями?
9. Что такое жидкие кристаллы?
10. Как классифицируются кристаллические жидкости? Какова их структура?
11. Где применяются жидкие кристаллы?

### 3.4\* ДЕФОРМАЦИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ. ЗАКОН ГУКА

Изменение формы или объема тела называется **деформацией**. Как показывает опыт, всякое твердое тело может быть деформировано, но во многих случаях деформации настолько малы, что незаметны невооруженным глазом. Например, деформация стальной балки практически незаметна, а резиновую нить можно легко растянуть вдвое.

В зависимости от способа приложения внешнего воздействия различают несколько типов деформаций: растяжения (рис. 3.13, а), сжатия (рис. 3.13, б), изгиба, кручения и др.

Исследуем подробнее деформацию растяжения твердого тела. Величину деформации характеризует **абсолютное удлинение**  $\Delta l = l - l_0$ . Так как эта величина зависит от начальной длины  $l_0$ , то удобнее использовать другую величину, относительное удлинение, обозначаемую греческой буквой  $\epsilon$ . Она показывает, какую часть от начальной длины  $l_0$  составляет абсолютное удлинение  $\Delta l$ :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (3.9)$$

Проанализируем деформацию растяжения с точки зрения возникающих сил. Деформированный стержень находится в равновесии, а это означает, что любая его точка тоже находится в равновесии. Это возможно, если в данной точке действуют некоторые внутренние силы  $\vec{F}'$  и  $\vec{N}'$  (рис. 3.13, а), равные внешним силам  $\vec{F}$  и  $\vec{N}$ . Что представляют собой внутренние силы и какова их роль?

Известно, что молекулы в кристаллической решетке находятся в состоянии устойчивого равновесия, определяемого минимумом их потенциальной энергии взаимодействия и равенством сил притяжения и отталкивания между ними. Под действием внешних сил  $\vec{F}$  и  $\vec{N}$  расстояние между молекулами увеличивается, но одновременно с этим начинают преобладать силы притяжения между молекулами, которые стремятся вернуть систему в начальное состояние устойчивого равновесия. Если выделить в стержне, подверженном растяжению, молекулярный слой АВ (рис. 3.13, а), то сила  $\vec{F}'$  будет равнодействующей тех сил, которыми молекулы

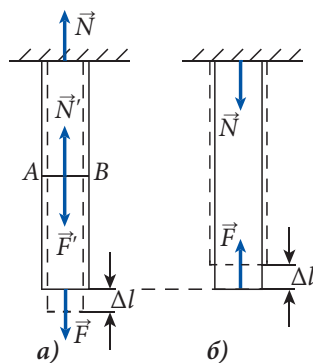


Рис. 3.13

нижней части стержня притягивают к себе слой  $AB$ , а  $\vec{N}'$  – равнодействующей сил, которыми молекулы верхней части стержня притягивают к себе слой  $AB$ . Чем больше внешние силы, тем больше станут и внутренние. Итак, внутренние силы – это межмолекулярные силы, противодействующие деформации. Они называются **силами упругости** и действуют как внутри тела, так и на внешние тела, вызывающие деформацию. Понятно, что для одного и того же удлинения величина силы упругости  $F_y$  тела зависит от его поперечного сечения. Во сколько оно будет больше, во столько же будет больше и  $F_y$ .

Величина, численно равная деформирующей силе  $F$ , действующей на единицу площади поперечного сечения  $S$  деформируемого тела, называется **механическим напряжением** и обозначается греческой буквой  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (3.10)$$

Единица измерения механического напряжения в СИ: ньютон на квадратный метр ( $\text{Н/м}^2$ ) или паскаль (Па).

Механическое напряжение характеризует свойство тел противодействовать деформации. Как показывает опыт, для большинства твердых тел можно построить график зависимости механического напряжения от относительного удлинения (диаграмму растяжений), показанный на *рисунке 3.14*. Часть  $0a$  графика соответствует прямой пропорциональной зависимости между механическим напряжением и относительным удлинением. Итак, при механических напряжениях из интервала  $(0, \sigma_y)$  твердые тела могут восстановить первоначальную форму и объем. Такое свойство называется упругостью, а деформация – **упругой**. Напряжение  $\sigma_y$ , соответствующее точке  $a$  на графике в конце прямолинейного участка, носит название **предела упругости**.

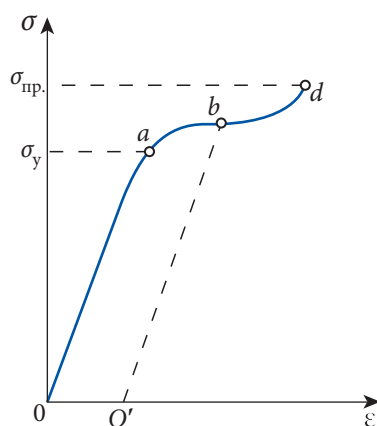


Рис. 3.14

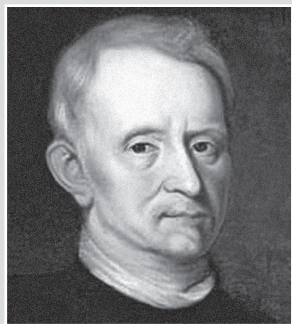
Участок  $ab$  графика характеризуется значительным удлинением при малом росте механического напряжения. После прекращения действия деформирующей силы относительное удлинение уменьшается, но не в соответствии с зависимостью  $ba0$ , а по прямой  $bO'$ . Итак, для величин механического напряжения, превысивших предел упругости  $\sigma_y$ , тело характеризуется **остаточной деформацией**. Свойство тела сохранять деформацию после прекращения действия силы называется **пластичностью**, а сохранившаяся деформация – **пластической**. Точка  $d$  на графике соответствует механическому напряжению  $\sigma_{пр}$  и называется **пределом прочности**, когда сила упругости уже не может уравновесить деформированную внешнюю силу и тело разрушается.

Прямолинейный участок диаграммы растяжения (*рис. 3.14*) соответствует простой математической зависимости:

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (3.11)$$

где коэффициент пропорциональности  $E$  называется **модулем Юнга** или **модулем упругости**. Он численно равен механическому напряжению  $\sigma$ , когда относительное удлинение тела  $\varepsilon$  равно единице. Следует отметить, что подобные удлинения не ре-





Исследовал явления, связанные с теплотой, упругостью, оптикой и небесной механикой. Ввел вместе с Х.Гюйгенсом (1665) реперные точки для термометров – плавления льда и кипения воды. Усовершенствовал микроскоп, провел ряд наблюдений, в результате чего открыл клеточную структуру растений. В 1672 году провел опыты по дифракции света, выдвинул гипотезу о поперечности световых волн. Раньше Ньютона (1674) выдвинул идею тяготения, в 1680 году пришел к выводу, что сила тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния между взаимодействующими телами.

ализуются на практике: у большинства твердых тел максимальные относительные удлинения составляют всего лишь  $10^{-3} \div 10^{-2}$ .

Уравнение (3.11) называется **законом Гука**. Он был открыт в 1660 году английским физиком Робертом Гуком (1635–1703):

**В пределах упругости механическое напряжение в деформированном теле прямо пропорционально его относительному удлинению.**

Если подставить (3.9) и (3.10) в (3.11), получим закон Гука, изученный в курсе механики X класса, в виде:

$$F = ES \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Закон Гука просто объяснить, проанализировав график межмолекулярных сил (рис. 1.3, б). Видно, что для малых изменений расстояний между молекулами около положения равновесия  $r_0$  межмолекулярная сила пропорциональна абсолютному удлинению:  $F \sim (r - r_0) \sim \Delta l$ . Действие ее в этом интервале расстояний всегда возвращает молекулы в начальные положения равновесия.

**Пример решения задачи**

**1**

**Дано:**

$x = \sigma_{\text{пр}}/\sigma = 5,$   
 $m = 200 \text{ кг},$   
 $\sigma_{\text{пр}} = 1,1 \cdot 10^8 \text{ Па},$   
 $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$   
 $S - ?; \varepsilon - ?$

Найдите площадь поперечного сечения и абсолютное удлинение алюминиевого стержня с запасом прочности  $x = 5$ , к концу которого подвешено тело массой  $m = 200 \text{ кг}$ . Для алюминия предел прочности  $\sigma_{\text{пр}} = 1,1 \cdot 10^8 \text{ Па}$ , модуль Юнга  $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$ . Запас прочности показывает, во сколько раз предел прочности  $\sigma_{\text{пр}}$  больше, чем механическое напряжение, возникающее в стержне под действием приложенной силы:  $x = \frac{\sigma_{\text{пр}}}{\sigma}$ .

**Решение**

Так как деформирующая сила равна силе тяжести, из (3.10) имеем:

$$S = \frac{mg}{\sigma} = \frac{mgx}{\sigma_{\text{пр}}}; \quad S \approx 0,91 \text{ см}^2.$$

Из закона Гука (3.11) для относительного удлинения получим:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma_{\text{пр.}}}{xE}; \quad \varepsilon \approx 3,1 \cdot 10^{-4} \quad \text{или} \quad \varepsilon \approx 0,03 \%$$

### Пример решения задачи

2

**Дано:**

$$l_0 = 1 \text{ м,}$$

$$m = 5 \text{ кг,}$$

$$S = 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$E = 1,08 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$\Delta l - ?$

Груз массой  $m = 5$  кг подвешен к концу медного кабеля длиной 1 м. Кабель вместе с грузом отклонили на угол  $\pi/2$  от вертикали и отпустили. Каким будет удлинение кабеля в нижней точке траектории движения груза? Площадь поперечного сечения кабеля равна  $1 \text{ мм}^2$ , масса его пренебрежимо мала. Модуль Юнга  $E = 1,08 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ .

### Решение

Согласно закону Гука удлинение кабеля определяется по формуле

$$\Delta l = \frac{Fl_0}{ES},$$

где  $l_0$  и  $S$  – это длина недеформированного кабеля и площадь его поперечного сечения, а  $F$  – сила, которая растягивает кабель в нижней точке траектории (рис. 3.15). В этой точке на груз действуют силы тяжести  $m\vec{g}$  и натяжения кабеля  $\vec{T}$ . Второй закон Ньютона в проекции на вертикальное направление имеет вид

$$T - mg = ma_{\text{ц}},$$

где  $a_{\text{ц}} = v^2/l$  – это центростремительное ускорение, а  $l$  – длина растянутого кабеля. Для определения скорости  $v$  в рассматриваемой точке применим закон сохранения энергии. В начальном положении (кабель с грузом отклонены от вертикали на  $90^\circ$ ) груз обладает только потенциальной энергией  $mgl$ , а в конечном (нижняя точка траектории) – только кинетической  $\frac{mv^2}{2}$ . Тогда

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

откуда  $v^2 = 2gl$ . Таким образом, из второго закона Ньютона для силы натяжения кабеля  $T$  в рассматриваемой точке, равной согласно третьему закону Ньютона силе  $F$  растяжения кабеля, получаем:

$$T \equiv F = m(a_{\text{ц}} + g) = m\left(\frac{v^2}{l} + g\right) = m\left(\frac{2gl}{l} + g\right) = 3mg,$$

а для удлинения кабеля:

$$\Delta l = \frac{3mgl_0}{ES}; \quad \Delta l = 1,38 \text{ мм.}$$

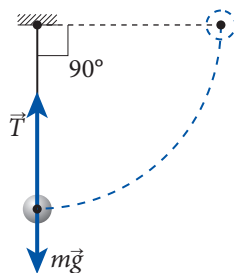


Рис. 3.15

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что называется деформацией?
2. Какие основные типы деформаций вы знаете? Приведите примеры.

3. Что представляет собой относительное удлинение и что оно характеризует?
4. Что представляют собой силы упругости и какова их роль?
5. Что называется механическим напряжением? В чем оно измеряется в СИ?
6. Что такое предел упругости? Опишите пластические деформации.
7. Сформулируйте закон Гука. Дайте ему объяснение, зная строение вещества.
8. Трос длиной 6,8 м под действием груза удлинился на 3,4 мм. Чему равно относительное удлинение троса?
9. Стержень длиной 2 м и сечением 5 см<sup>2</sup> закреплен за верхний конец, а к нижнему подвешен груз весом 5 кН. Модуль Юнга для стержня  $E = 70$  ГПа. Найдите:
  - а) механическое напряжение материала, из которого сделан стержень;
  - б) относительное удлинение стержня;
  - в) абсолютное удлинение стержня.

### 3.5\* ТЕПЛОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ И ЖИДКОСТЕЙ

Как показывает опыт, большинство твердых и жидких тел, как и газы, при нагревании увеличивают объем. Внутренняя структура и свойства твердых тел и жидкостей различны, но механизм теплового расширения одинаков. В самом деле, нагревание вещества сопровождается ростом кинетической энергии молекул. На *рисунке 3.16* показана зависимость потенциальной энергии двух молекул (*A* и *B*) от расстояния между ними (*рис. 1.3, в*). Если кинетическая энергия молекул увеличивается до  $E_{к1}$  (состояние с температурой  $T_1$ ), то молекулы находятся на среднем расстоянии  $r_1 > r_0$  одна от другой. Если температура системы растет до  $T_2$ , то кинетическая энергия молекул становится  $E_{к2} > E_{к1}$ , а среднее расстояние между ними —  $r_2 > r_1$  (*рис. 3.16*). Увеличение среднего расстояния между молекулами объясняется несимметричностью кривой потенциальной энергии системы (*рис. 3.16*). Когда энергия системы растет, положение устойчивого равновесия перемещается в сторону более медленного изменения потенциальной энергии, то есть в сторону роста расстояния между молекулами. На *рисунке 3.16* это перемещение показано штриховой линией.

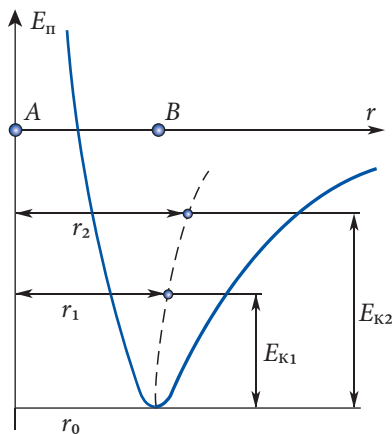


Рис. 3.16

График потенциальной энергии как функции расстояния между молекулами допускает только качественное объяснение явления теплового расширения. Для количественного описания необходимо обратиться к результатам экспериментов. А они показали, что как для твердых, так и для жидких тел относительное изменение объема  $\Delta V/V_0$  в малом интервале температур прямо пропорционально изменению температуры  $\Delta T$ :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta \Delta T. \quad (3.12)$$

Пусть в формуле (3.12)  $\Delta V = V - V_0$ , где  $V_0$  – объем тела при  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , а  $\Delta T = t - t_0 = t$ .  
Из (3.12) получим:  $\frac{V - V_0}{V_0} = \beta t$

или

$$V = V_0(1 + \beta t), \quad (3.13)$$

где коэффициент пропорциональности  $\beta$  – **температурный коэффициент объемного расширения** и зависит от природы вещества и внешних условий. Он показывает, на какую долю начального объема, взятого при  $0^\circ\text{C}$ , изменяется объем тела при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  (1 К). Так как относительное изменение объема безразмерно, из (3.12) следует, что в СИ  $[\beta] = \text{K}^{-1}$ . Численное значение коэффициента  $\beta$  различно для твердых тел и жидкостей. Как показывают измерения, для жидкостей  $\beta \sim (10^{-3} \div 10^{-4}) \text{K}^{-1}$ , а для твердых тел значительно меньше –  $(10^{-5} \div 10^{-6}) \text{K}^{-1}$ . Вот почему расширение твердых тел плохо видно невооруженным глазом.

Выражения (3.12) и (3.13) для теплового объемного расширения верны, когда масса вещества не меняется в процессе расширения. Это означает, что плотность твердых тел и жидкостей зависит от температуры. Действительно, плотность вещества при  $0^\circ\text{C}$  равна  $\rho_0 = m/V_0$ , а при температуре  $t$  плотность  $\rho = m/V$  и из (3.13) получим:

$$\rho = \rho_0/(1 + \beta t), \quad (3.14)$$

откуда следует, что при нагревании плотность тел уменьшается, а при охлаждении – растет.

В природе известны и отклонения от зависимости (3.13) или (3.14). Например, при охлаждении воды объем непрерывно уменьшается (плотность растет) до  $4^\circ\text{C}$ . Но при дальнейшем охлаждении до  $0^\circ\text{C}$ , когда происходит кристаллизация, зависимости (3.13) и (3.14) не соблюдаются. В этом интервале температур  $(4-0)^\circ\text{C}$  имеет место обратный процесс: объем растет, а плотность уменьшается. Эта аномалия объясняется особенностями внутренней структуры вещества. Начиная с температуры  $4^\circ\text{C}$ , происходит перестройка ближнего порядка. Между молекулами воды появляются связи, характерные для дальнего порядка, начинает формироваться кристаллическая решетка льда, имеющая пустоты. Именно эти пустоты приводят к росту объема воды в интервале от  $4$  до  $0^\circ\text{C}$ . Такую же аномалию имеют и другие вещества: висмут (Bi), галлий (Ga), германий (Ge), кремний (Si), чугун.

Тепловое расширение твердых тел и жидкостей одинаково во всех направлениях. Это объясняется изотропией жидкостей и большинства твердых тел с поликристаллической структурой. Однако есть много примеров ярко выраженного расширения твердых тел в определенном направлении, например, рельсов железной дороги, паропроводов и т.д. В таких случаях говорят о линейном расширении твердых тел.

Если тело имеет длину  $l_0$  при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , а при температуре  $t$  – длину  $l$ , то при нагревании его на  $\Delta T = \Delta t = t - t_0 = t$  абсолютное удлинение  $\Delta l = l - l_0$ . Относительное удлинение  $\frac{\Delta l}{l_0}$  пропорционально  $\Delta T$ . Опыт показывает, что

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \cdot \Delta T. \quad (3.15)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  называется **температурным коэффициентом линейного расширения** и показывает, на какую долю начальной длины, взятой при  $0^\circ\text{C}$ , удлинится тело при нагревании на  $1^\circ\text{C}$  (1 К).

Из (3.15) для длины тела при температуре  $t$  получим:

$$l = l_0 (1 + \alpha t). \quad (3.16)$$

Между линейным и объемным коэффициентами теплового расширения ( $\alpha$  и  $\beta$ ) существует простая связь. Чтобы ее получить, рассмотрим тело в форме куба при температуре  $0^\circ\text{C}$ , имеющего сторону длиной  $l_0$  и объем  $V_0 = l_0^3$ . После нагрева до температуры  $t$  объем, согласно выражению (3.13), изменится:

$$V = V_0(1 + \beta t) = l_0^3 (1 + \beta t).$$

С другой стороны, в результате линейного расширения каждой стороны куба из (3.16) следует, что

$$V = l^3 = l_0^3(1 + \alpha t)^3.$$

Из этих двух выражений получим:

$$1 + \beta t = 1 + 3\alpha t + 3\alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3.$$

Так как значение  $\alpha$  очень мало, то членами  $\alpha^2$  и  $\alpha^3$  можно пренебречь и тогда

$$\beta = 3\alpha. \quad (3.17)$$

Поскольку в справочных таблицах даются только значения температурных коэффициентов линейного расширения твердых тел, то рациональнее переписать выражение (3.13) в виде:

$$V = V_0(1 + 3\alpha t). \quad (3.18)$$

Рассуждая таким же образом, для нахождения площади поверхности  $S$  твердого тела при температуре  $t$  можно вывести формулу:

$$S = S_0(1 + 2\alpha t), \quad (3.19)$$

где  $S_0$  – площадь поверхности тела при  $0^\circ\text{C}$ .

### Пример решения задачи

1

#### Дано:

$$Q = 2 \text{ МДж},$$

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

$$c = 0,46 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}},$$

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{К}^{-1}$$

$$\Delta V - ?$$

#### СИ:

$$2 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Железному шару сообщили количество теплоты, равное 2 МДж. На сколько увеличился объем шара в результате нагревания?

### Решение

В соответствии с (3.12) изменение объема шара прямо пропорционально изменению температуры:

$$\Delta V = \beta V_0 \Delta T = 3\alpha V_0 \Delta T,$$

где  $\beta$  ( $\alpha$ ) – температурный коэффициент объемного (линейного) расширения, а  $V_0$  – объем шара при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Количество теплоты, необходимое для нагревания шара на  $\Delta T$ :

$$Q = mc\Delta T,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость железа (берется из таблиц), а массу шара можно выразить через плотность  $\rho$  и объем  $V_0$ :  $m = \rho V_0$ . Тогда:

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{Q}{\rho V_0 c}.$$

Для изменения объема шара при его нагревании получаем:

$$\Delta V = \frac{3\alpha V_0 Q}{\rho V_0 c} = \frac{3\alpha}{\rho c} Q; \Delta V \approx 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 = 20 \text{ см}^3.$$

### Пример решения задачи

2

#### Дано:

$\Delta T = 20 \text{ К},$   
 $E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па},$   
 $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$   
 $\sigma = ?$

Стальная балка жестко закреплена между двумя стенками. Определите механическое напряжение, возникающее при ее нагревании на  $\Delta T = 20 \text{ К}$  от  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Для стали модуль Юнга  $E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ , а термический коэффициент линейного расширения  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ .

#### Решение

Так как балка жестко закреплена между двумя стенками и не имеет возможности удлиниться, в ней возникает механическое напряжение, которое согласно закону Гука (3.11) равно:  $\sigma = E\varepsilon$ , где  $\varepsilon = \Delta l/l_0$  – относительное удлинение.

Это удлинение произошло бы при нагреве, если бы балка не была закреплена.

Из (3.15) имеем:  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$ . Подставим это выражение в закон Гука и получим:

$$\sigma = E\alpha \Delta T; \quad \sigma \approx 53 \text{ МПа}.$$

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Объясните механизм теплового расширения.
2. Что представляет собой термический коэффициент объемного расширения и в каких единицах он измеряется в СИ?
3. Чем отличается тепловое расширение твердых тел от теплового расширения жидкостей?
4. Как зависит плотность твердых тел и жидкостей от температуры?
5. Что представляет собой термический коэффициент линейного расширения?
6. Какая связь существует между термическими коэффициентами линейного и объемного расширения?
7. В стальном предмете имеется полость, объем которой при  $0^\circ\text{C}$  равен  $200 \text{ см}^3$ . Чему равен ее объем при температуре  $10^\circ\text{C}$ ? Термический коэффициент линейного расширения стали  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ .

8. На сколько процентов увеличится объем жидкости при изменении температуры на 25 К? Термический коэффициент объемного расширения этой жидкости  $\beta = 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Начальная температура  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ .
9. Длина медной проволоки при температуре  $0^\circ\text{C}$  равна 5 м. До какой температуры надо ее нагреть, чтобы получить удлинение в 3 см? Термический коэффициент линейного расширения меди равен  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

## 3.6\* ПАРООБРАЗОВАНИЕ И КОНДЕНСАЦИЯ

Ранее были изучены физические свойства вещества, находящегося в одном из агрегатных состояний: твердом, жидком или газообразном. Опыт показывает, что при определенных условиях давления и температуры вещество может находиться одновременно в разных агрегатных состояниях, называемых **фазами**, или полностью переходить из одного состояния в другое. В этом случае говорят, что имеет место **фазовое превращение** или **переход**.

Изучим сначала фазовое превращение жидкость–газ.

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется **парообразованием** и, наоборот, – переход из газообразного состояния в жидкое – **конденсацией**.

Парообразование жидкости осуществляется в виде **испарения** или **кипения**.

### а. Испарение. Ненасыщенные и насыщенные пары

Парообразование, происходящее при любой температуре и только со свободной поверхности жидкости, называется **испарением**.

Проанализируем процесс испарения жидкости с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Известно, что свободная поверхность жидкости представляет собой поверхностный слой, на молекулы которого действуют находящиеся глубже молекулы с силами, равнодействующая которых  $\vec{F}_{\text{ж}}$  направлена в глубь жидкости и тормозит выход из нее молекул поверхностного слоя. Наряду с колебательными движениями, молекулы жидкости совершают и поступательные движения (рис. 1.4, б) со средней скоростью, которая растет с повышением температуры. Если в результате соударений между молекулами поверхностного слоя некоторые из них получают скорости выше средней, то их кинетические энергии могут быть достаточны для совершения механической работы против силы  $\vec{F}_{\text{ж}}$ . Именно эти молекулы могут покинуть свободную поверхность жидкости и создать над ней **газообразную фазу** или **пары** жидкости.

Из рисунка 3.17 видно, что на молекулы, центры которых находя-

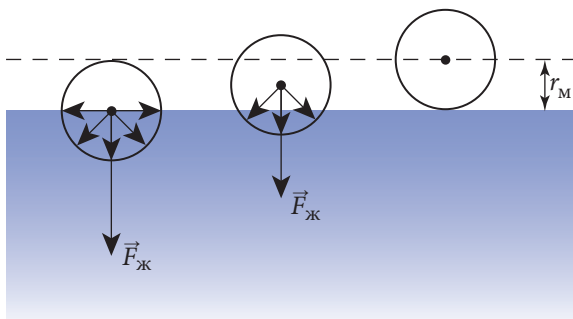


Рис. 3.17

тся от свободной поверхности жидкости на расстоянии, меньшем радиуса молекулярного действия  $r_m$ , действуют молекулярные силы  $\vec{F}_j$ , направленные внутрь жидкости. Эти молекулы возвращаются назад, в жидкость. Итак, покинуть жидкость могут только те молекулы, кинетическая энергия которых больше механической работы, необходимой для преодоления молекулярных сил  $\vec{F}_j$ , действующих в слое толщиной  $r_m$ . Так как покинувшие жидкость молекулы получили в результате соударений от тех, что остались, часть их кинетической энергии, то средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается, а значит, при испарении температура жидкости уменьшается. Так объясняется наше ощущение холода при выходе из воды.

В результате хаотического движения часть молекул из газообразной фазы попадает в слой толщиной  $r_m$  (рис. 3.17), и силы  $\vec{F}_j$  возвращают их в жидкость. Это означает, что наряду с испарением происходит конденсация паров жидкости. Возвращающиеся в жидкость молекулы имеют кинетическую энергию, бóльшую, чем молекулы жидкости, и часть ее передают своему новому окружению. Поэтому средняя кинетическая энергия молекул жидкости увеличивается, температура ее растет.

Итак, на поверхности жидкости в одно и то же время имеют место два явления: испарение (с поглощением энергии) и конденсация (с выделением энергии). Если преобладает процесс испарения, жидкость остывает, если конденсации – нагревается.

Рассмотрим явление испарения жидкости, занимающей в закрытом сосуде только часть объема. В этом случае уровень жидкости остается постоянным. Число молекул, покидающих жидкость в единицу времени, испаряясь, равно числу молекул, возвращающихся назад в результате конденсации. Температура жидкости снижается при испарении точно на столько, на сколько растет при конденсации. В итоге жидкость и ее пар находятся в состоянии равновесия. Так как процессы испарения и конденсации протекают одинаково интенсивно, то это равновесие непрерывно изменяется, поэтому называется **динамическим равновесием**.

**Пары, находящиеся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называются насыщенными.**

Ясно, что при данной температуре насыщенные пары содержат максимальное число молекул в единице объема, имея максимальные концентрацию  $n$  и плотность  $\rho$ , действуя на жидкость с максимальным давлением  $p_{\text{нас}}$ . Максимальные значения давления и плотности зависят от природы жидкостей. Жидкости, у которых межмолекулярные силы велики, достигают динамического равновесия со своими парами при меньших плотностях и давлениях, чем жидкости с малыми межмолекулярными силами. В самом деле, при данной температуре число молекул, покидающих жидкость, больше в том случае, если нужно совершить меньшую работу против сил притяжения.

**Пары, не находящиеся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называются ненасыщенными.**

Другими словами, пары не насыщены, когда преобладает испарение или жидкость полностью испарилась. Давление и плотность ненасыщенных паров всегда меньше, чем у паров, насыщенных при той же температуре.



Как показывает опыт, ненасыщенные пары подчиняются газовым законам: Бойля–Мариотта, Шарля, Гей-Люссака, уравнению Клапейрона–Менделеева, изученным в п. 1.8. Свойства их тем ближе к идеальным газам, чем дальше пары от насыщения.

Свойства ненасыщенных паров можно изучить с помощью установки (рис. 3.18). Она состоит из цилиндрической стеклянной трубки, укрепленной держателем  $S$  в сосуде с водой. Трубка снабжена на открытом конце воронкой,

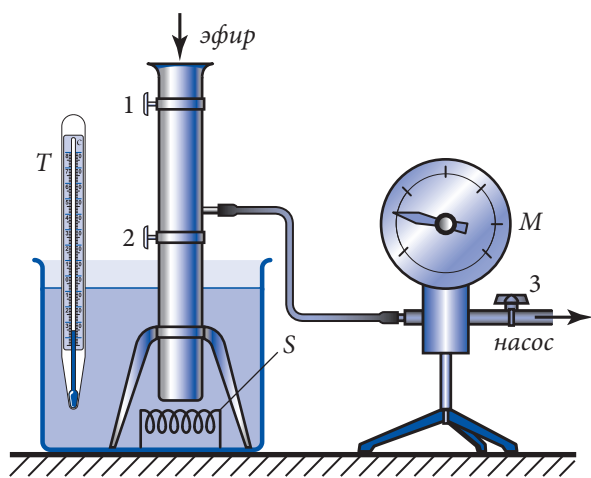


Рис. 3.18

двумя кранами (1 и 2) и соединена с манометром  $M$ , с помощью которого измеряется давление. Закроем кран 1, откроем краны 2 и 3 и насосом откачаем воздух из трубки. Когда показания манометра приблизительно будут равны нулю, закроем краны 2 и 3, а в воронку нальем жидкость (например, эфир). Откроем кран 1 и введём несколько капель эфира в безвоздушное пространство между кранами 1 и 2 объемом  $V_1$ . Так как внутри трубки эфир в жидком состоянии не виден, а манометр сразу начал показывать определенное давление, это означает, что **испарение в вакууме происходит практически мгновенно.**

Добавляя с помощью крана 1 эфир, мы увидим, что давление паров растет до значения  $p_{\text{нас}}$ , то есть до насыщения. С этого момента в трубке появляются первые капельки в жидком состоянии, после чего давление уже не меняется, сколько бы эфира не вводилось бы в трубку. Итак,

**при данной температуре давление насыщенных паров остается постоянным и не зависит ни от массы жидкости, ни от массы паров, контактирующих с ней.**

Если взять большое количество эфира и открыть кран 2, то объем, занимаемый насыщенными парами, возрастет до  $V_2$ , но показания манометра останутся неизменными. Понятно, что рост объема приводит к нарушению динамического равновесия и новая порция эфира мгновенно испарится, увеличив как число молекул паров, так и их массу. Число молекул паров растет, пока не достигнет максимального значения концентрации, то есть пока не установится динамическое равновесие и пары опять станут насыщенными, оказывая то же давление  $p_{\text{нас}}$ , регистрируемое манометром. Итак,

**давление насыщенных паров не зависит от объема, который они занимают.**

На рисунке 3.19 показана изотерма паров некоторой жидкости. Горизонтальный участок  $AB$  означает, что давление насыщенных паров не зависит

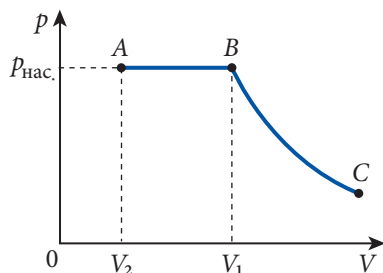


Рис. 3.19

ни от занимаемого объема, ни от массы жидкости или ее паров. Если в результате роста объема вся жидкость превратится в пары, то они станут ненасыщенными и зависимость давления от объема будет приблизительно описываться законом Бойля-Мариотта (дуга гиперболы  $BC$ ).

Зависимость давления насыщенных паров от температуры при постоянном объеме изучим с помощью этой же установки (рис. 3.18). При нагревании воды в сосуде растет температура паров эфира. Отмечая показания термометра  $T$  и манометра  $M$ , заметим, что **при росте температуры давление насыщенных паров увеличивается**.

Однако эта зависимость не линейна, как у идеальных газов. То есть насыщенные пары не подчиняются закону Шарля. На рисунке 3.20 приблизительно показана зависимость давления насыщенных паров некоторой жидкости от температуры. На участке  $AB$  давление насыщенных паров быстро растет по двум причинам. Во-первых, растет средняя кинетическая энергия молекул паров и, во-вторых, растет число молекул в единице объема, то есть масса паров, образовавшихся в результате испарения. Когда вся жидкость превратится в пары, которые станут ненасыщенными, зависимость давления от температуры будет приблизительно описываться законом Шарля (участок  $BC$  на рис. 3.20).

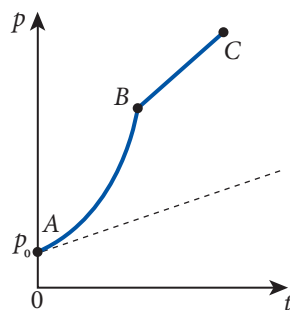


Рис. 3.20

Отсюда следует:

**законы идеального газа не применимы в случае насыщенных паров, так как их массы непостоянны.**

Так как уравнение Клапейрона-Менделеева описывает состояние газа, то его можно применить для описания состояния паров даже если их масса меняется.

## 6. Влажность воздуха. Измерение влажности

Известно, что 2/3 нашей планеты покрыто водой. Так как испарение происходит при любой температуре, в нижних слоях атмосферы Земли всегда находятся водяные пары.

**Величина, характеризующая содержание водяных паров в атмосфере Земли, называется влажностью воздуха.**

Степень влажности воздуха очень важна как для флоры и фауны Земли, так и для многих процессов в природе. А необходимость измерений, связанных с влажностью воздуха в разных областях техники, очевидна (производство и хранение сахара, бумаги, тканей, цемента и т.д.).

Для количественного описания влажности воздуха различают **влажность абсолютную и относительную**.

**Величина, равная плотности водяных паров  $\rho$  в атмосфере, называется абсолютной влажностью.**

В одинаковых условиях численное значение плотности водяных паров, выраженное в  $г/м^3$ , примерно совпадает с его парциальным давлением, измеренным в

мм ртутного столба. Поэтому в метеорологии абсолютную влажность определяют обычно не как плотность паров, а как их давление.

Степень влажности воздуха зависит от температуры. Одна и та же плотность водяных паров в атмосфере прохладным весенним днем может быть близка к насыщению и воздух будет влажным, а в жаркий летний день – далека от насыщения и воздух будет сухим. Итак, важно знать, насколько пары близки к состоянию насыщения.

**Относительная влажность** представляет собой величину, выражаемую, как правило, в процентах и численно равную отношению между плотностью водяных паров  $\rho$ , находящихся в атмосфере при данной температуре, и плотностью насыщенных паров  $\rho_{\text{нас}}$  при этой температуре:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_{\text{нас}}} \cdot 100\%. \quad (3.20)$$

Если использовать связь между плотностью и давлением, выраженную отношением (3.1), то относительную влажность можно найти с помощью давлений:

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{нас}}} \cdot 100\%, \quad (3.21)$$

где  $p$  – давление водяных паров в атмосфере при данной температуре, а  $p_{\text{нас}}$  – давление насыщенных водяных паров при этой же температуре.

Для вычисления относительной влажности используются величины плотностей и давлений насыщенных паров при данной температуре (см. таблицу).

$t$ ° (C)	$p$ (кПа)	$\rho$ ( $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> )	$t$ ° (C)	$p$ (кПа)	$\rho$ ( $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> )	$t$ ° (C)	$p$ (кПа)	$\rho$ ( $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> )
-5	0,401	3,24	7	1,000	7,8	19	2,199	16,3
-4	0,437	3,51	8	1,066	8,2	20	2,333	17,3
-3	0,476	3,81	9	1,146	8,8	21	2,493	18,3
-2	0,517	4,13	10	1,226	9,4	22	2,639	19,4
-1	0,563	4,47	11	1,306	10,0	23	2,813	20,6
0	0,613	4,80	12	1,399	10,7	24	2,986	21,8
1	0,653	5,20	13	1,492	11,4	25	3,173	23,0
2	0,706	5,60	14	1,599	12,0	26	3,359	24,4
3	0,760	6,00	15	1,706	12,8	27	3,559	25,8
4	0,813	6,40	16	1,813	13,7	28	3,786	27,2
5	0,880	6,80	17	1,933	14,5	29	3,999	28,7
6	0,933	7,30	18	2,066	15,4	30	4,239	30,3

Посмотрим, как влияет изменение температуры на влажность воздуха. Допустим, что днем при температуре  $t_1 = 24$  °C абсолютная влажность воздуха  $\rho$  равна  $0,012$  кг/м<sup>3</sup>. Плотность насыщенных паров при этой температуре  $\rho_{\text{нас.1}} = 0,0218$  кг/м<sup>3</sup> (величина взята из таблицы) и из (3.20) следует, что относительная влажность составляет примерно 55%. Предположим, что ночью температура воздуха снизилась до  $t_1 = 14$  °C, а

плотность (давление) паров осталась без изменений. Тогда относительная влажность станет равной 100%, так как при этой температуре пары станут насыщенными:  $\rho = \rho_{\text{нас.2}} \approx 0,012 \text{ кг/м}^3$ . Если к утру температура воздуха опустится до  $t_1 = 8^\circ\text{C}$  ( $\rho_{\text{нас.3}} \approx 0,008 \text{ кг/м}^3$ ), то часть водяных паров образует росу в результате конденсации – из каждого кубометра воздуха  $(\rho_{\text{нас.2}} - \rho_{\text{нас.3}}) \cdot 1 \text{ м}^3 = 0,004 \text{ кг паров}$ .

**Температура, при которой в процессе охлаждения воздуха при постоянном давлении пары воды становятся насыщенными, называется точкой росы.**

В приведенном выше примере температура  $t_p = t_2 = 14^\circ\text{C}$  и есть точка росы. Если известна точка росы  $t_p$ , тогда абсолютная влажность воздуха равна плотности насыщенных паров воды для этой температуры.

Большинство приборов, используемых для измерения влажности воздуха, называются **гигрометрами**, они отличаются по принципу действия и устройству.

Действие конденсационного гигрометра основано на измерении точки росы. Он состоит из закрытой металлической коробочки  $C$  с отполированной боковой поверхностью  $N$ , окруженной кольцом  $I$ , и двумя отверстиями (рис. 3.21). Через одно из них наливают эфир, затем вставляют термометр  $T$ , а через второе накачивается воздух с помощью груши  $P$ . Поток воздуха в коробочке с эфиром ускоряет процесс испарения, в результате чего ее температура уменьшается, охлаждая и атмосферный воздух в непосредственной близости от коробочки. Когда водяные пары становятся насыщенными, наблюдается их конденсация на полированной поверхности  $N$ , ее запотевание. В этот момент считывается показание термометра  $T$ . Это и есть точка росы  $t_p$ . С помощью таблицы находится абсолютная влажность.

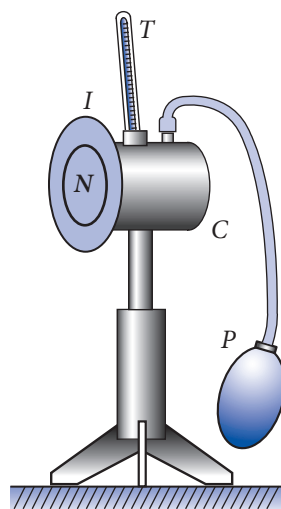


Рис. 3.21

Относительную влажность можно измерить волосным гигрометром. Его основной частью является натянутый обезжиренный человеческий волос, который укорачивается (удлиняется) при уменьшении (увеличении) относительной влажности. Эти изменения длины передаются через специальное устройство на стрелку прибора с отградуированной в процентах шкалой. Очень легко и быстро можно находить относительную влажность и с помощью **психрометра** (рис. 3.22), состоящего из двух одинаковых термометров. Резервуар одного из них обмотан ватой, тканью и пропитан водой. Вода испаряется, поэтому влажный термометр показывает температуру ниже, чем соседний сухой. Так как скорость испарения выше, если воздух сухой, разность между показаниями термометров тем больше, чем относительная влажность меньше. С помощью **психрометрической таблицы**, которой снабжен каждый психрометр, находится относительная влажность воздуха.

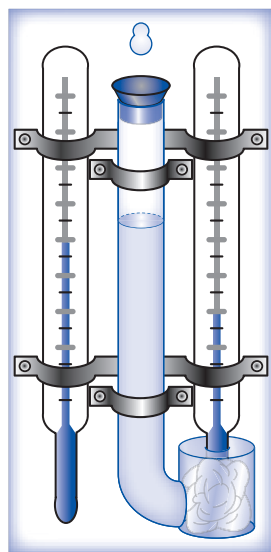


Рис. 3.22

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометров, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	82	63	45	28	11					
1	100	83	65	48	32	16					
2	100	84	68	51	35	20					
3	100	84	69	54	39	24	10				
4	100	85	70	56	42	28	14				
5	100	86	72	58	45	32	19	6			
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
7	100	87	74	61	49	37	26	14			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
9	100	88	76	64	53	42	31	21	11		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17	8	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33
26	100	92	85	78	71	64	58	51	45	40	34
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

## в. Кипение. Температура кипения

Наряду с испарением, происходящим при любой температуре, но только с поверхности жидкости, существует и форма парообразования, когда пары образуются по всему объему жидкости, но только при определенной температуре.

Парообразование, происходящее по всему объему жидкости, называется **кипением**.

Опыт показывает, что кипение (в данных условиях) всегда начинается при одной и той же температуре, называемой **температурой кипения**, которая остается постоянной во время превращения жидкости в пары.

Проследим за процессом кипения жидкости (например, воды), отметив сначала, что в природе нет абсолютно однородных чистых жидкостей. В каждой жидкости существуют пузырьки газа (например, воздуха) настолько маленькие, что они невидимы невооруженным глазом. Кроме того, существуют пузырьки и на стенках сосуда с жидкостью, удерживаемые межмолекулярными силами  $F_{\text{тв.т.-газ}}$ . На поверхности каждого пузырька непрерывно происходит испарение жидкости и конденсация паров, так что внутри них при любой температуре устанавливается динамическое равновесие и пары жидкости являются насыщенными.

При невысоких температурах давление внутри пузырька, согласно закону Дальтона, равно сумме парциальных давлений насыщенных паров  $p_{\text{нас}}$  и воздуха  $p_{\text{в}}$  в них. Снаружи на пузырек действуют атмосферное давление  $p$ , гидростатическое давление  $p_h$  (пузырек на глубине  $h$ ). Очевидно, в состоянии механического равновесия давления наружное и внутри пузырька должны быть практически одинаковы:

$$p_{\text{нас}} + p_{\text{в}} \approx p + p_h. \quad (3.22)$$

При нагревании жидкости давление насыщенных паров  $p_{\text{нас}}$  внутри пузырьков растет. Следовательно, их объем растет, а давление воздуха  $p_{\text{в}}$  в них падает. Когда размеры пузырьков становятся достаточно большими ( $\sim 1$  мм), сила Архимеда превышает межмолекулярные силы  $F_{\text{тв.т.-газ}}$ , пузырьки отрываются от стенок и дна сосуда, поднимаясь к поверхности жидкости. На их месте остаются микроскопические пузырьки, центры парообразования, в которых растет порция насыщенных паров жидкости. Вначале верхние слои жидкости еще холоднее нижних слоев у дна сосуда. Пары внутри пузырьков здесь конденсируются, а воздух растворяется в жидкости и объем пузырьков уменьшается, практически они не достигают поверхности (рис. 3.23, а). Этот этап подъема пузырьков сопровождается характерным шумом (пузырьки “шумят” при возникновении, отрыве и в момент схлопывания в еще холодных слоях жидкости) в начале кипения.

Когда температура жидкости в сосуде выравнивается благодаря конвекции, объем пузырьков начинает расти. Если температура жидкости постоянна, то и давление

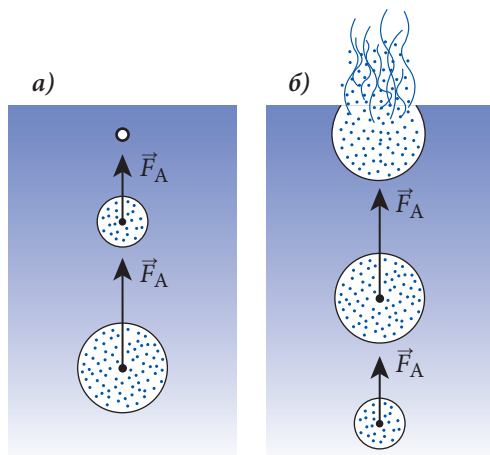


Рис. 3.23

насыщенных паров постоянно, но так как с высотой уменьшается гидростатическое давление  $p_h$ , то внутреннее давление в пузырьках становится больше внешнего (3.22) и размеры пузырьков растут.

Достигая поверхности жидкости, пузырьки лопаются, выбрасывая в воздух содержащиеся в них насыщенные пары (рис. 3.23, б) – начинается кипение. Так как на поверхности  $p_h = \rho gh = 0$ , а давление воздуха в пузырьке  $p_v$  пренебрежимо мало, то из (3.22) следует вывод, что условие кипения:

$$p_{\text{нас.}} \geq p. \quad (3.23)$$

Итак,

кипение жидкости происходит при такой температуре, когда давление насыщенных паров жидкости равно или больше внешнего давления.

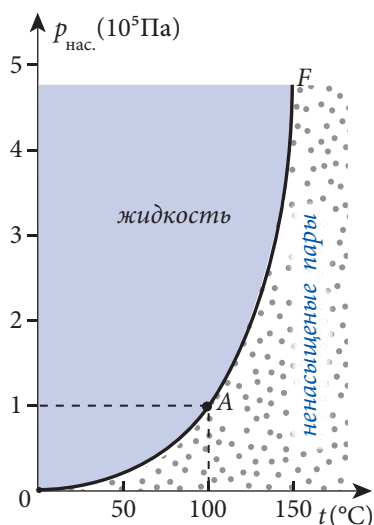


Рис. 3.24

Температура, при которой давление насыщенных паров равно внешнему давлению на поверхность жидкости, называется **температурой** или **точкой кипения**.

Так как давление насыщенных паров  $p_{\text{нас.}}$  зависит от температуры, из (3.23) следует, что температура кипения зависит от внешнего давления, действующего на жидкость. При росте внешнего давления температура кипения растет. На рисунке 3.24 показана зависимость давления насыщенных паров воды от температуры. Точки на кривой  $OF$  соответствуют состоянию динамического равновесия между водой и ее парами, а координаты точек – температуре кипения и соответствующим этим температурам давлениям. Каждая точка слева от кривой  $OF$  соответствует жидкому состоянию воды, а в правой части – газообразному состоянию (ненасыщенные пары). Итак, вода, как и всякая жидкость, может кипеть при любой температуре, для которой выполняется условие (3.23). Если жидкость кипит при нормальном атмосферном давлении, соответствующую температуру называют **нормальной температурой кипения**, для воды (рис. 3.24, точка  $A$ ), как известно, это  $100^\circ\text{C}$ . При давлениях выше нормального атмосферного  $p > p_0$  температура кипения растет, а для  $p < p_0$  соответственно уменьшается.

Кипение жидкости при повышенных или пониженных давлениях, то есть при температурах выше или ниже нормальной температуры кипения, широко используется в химической и пищевой промышленности, медицине и т.д. Например, дистилляцию некоторых жидкостей, разделяющихся на составляющие при нормальной температуре кипения, проводят при пониженных давлениях, а медицинские инструменты стерилизуют кипением при повышенных давлениях ( $p = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ). Тогда температура кипения воды равна  $120^\circ\text{C}$ , большинство микробов гибнет.

Выше отмечалось, что молекулы, покидающие жидкость при парообразовании, уносят с собой часть энергии жидкости, что приводит к снижению ее температуры. Значит, для поддержания процесса кипения необходимо подводить количество теплоты, в точности равное тому, что уносят испарившиеся молекулы.

Итак, жидкость кипит, если непрерывно подводится энергия, причем температура кипения остается постоянной (при постоянном внешнем давлении). В этом случае поглощенное тепло расходуется только на парообразование.

Количество теплоты, необходимое для превращения в пар единицы массы жидкости  $m$  при постоянной температуре, называется **удельной теплотой парообразования**:

$$\lambda_{\text{п}} = \frac{Q_{\text{п}}}{m}. \quad (3.24)$$

Она зависит от природы вещества, температуры парообразования и в СИ измеряется в Дж/кг.

Итак, для превращения жидкости массой  $m$  в пар, ей нужно передать количество теплоты:

$$Q_{\text{п}} = \lambda_{\text{п}} m. \quad (3.25)$$

Количество теплоты, выделяющееся при конденсации этой же массы паров, численно равно количеству теплоты, поглощенному для парообразования:

$$Q_{\text{к}} = \lambda_{\text{к}} m, \quad (3.26)$$

где  $\lambda_{\text{к}}$  – удельная теплота конденсации. Численное равенство количества теплоты  $Q_{\text{п}}$  и  $Q_{\text{к}}$  демонстрирует закон сохранения энергии при изменении агрегатного состояния вещества.

Из (3.25) и (3.26) следует равенство удельных теплот парообразования и конденсации  $\lambda_{\text{к}} = \lambda_{\text{п}}$ , поэтому в таблицах даны только значения для  $\lambda_{\text{п}}$ .

### Пример решения задачи

1

#### Дано:

$$t_1 = 25^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 13^\circ\text{C},$$

$$t_3 = 20^\circ\text{C},$$

$$\rho_{\text{нас.1}} = 0,023 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{нас.2}} = 0,0114 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho_{\text{нас.3}} = 0,0173 \text{ кг/м}^3$$

$$\Delta\varphi - ?$$

Определите абсолютную и относительную влажности воздуха в помещении с температурой  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ , если точка росы равна  $t_2 = 13^\circ\text{C}$ . Как изменится относительная влажность, если воздух охлаждается до  $t_3 = 20^\circ\text{C}$ , а абсолютная влажность остается постоянной? Плотности насыщенных паров воды при температурах  $t_1, t_2, t_3$  равны соответственно  $\rho_{\text{нас.1}} = 0,023 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{нас.2}} = 0,0114 \text{ кг/м}^3, \rho_{\text{нас.3}} = 0,0173 \text{ кг/м}^3$ .

#### Решение

Из определения точки росы следует, что абсолютная влажность  $\rho_1$  при температуре  $t_1$  равна плотности насыщенных паров при температуре, называемой точкой росы. Итак,

$$\rho_1 = \rho_{\text{нас.2}} = 0,0114 \text{ кг/м}^3.$$

Из (3.20) следует, что относительная влажность при этой температуре

$$\varphi_1 = \frac{\rho_1}{\rho_{\text{нас.1}}} \cdot 100\%; \quad \varphi_1 \approx 49,6\%.$$

а при температуре  $t_3$



$$\varphi_3 = \frac{\rho_1}{\rho_{\text{нас.3}}} \cdot 100\%; \quad \varphi_3 \approx 65,9\%.$$

Так как абсолютная влажность остается постоянной, то  $\rho_3 = \rho_1$  и относительная влажность увеличивается на

$$\Delta\varphi = \varphi_3 - \varphi_1 = 65,9\% - 49,6\%; \quad \Delta\varphi \approx 16,3\%.$$

### Пример решения задачи

2

#### Дано:

$m = 1$  кг,  
 $V = 1$  л,  
 $T = 373$  К,  
 $p = 10^5$  Па,  
 $\lambda_{\text{п}} = 2,26$  МДж/кг  
 $v - ?$

#### СИ:

$10^{-3}$  м<sup>3</sup>,  
 $2,26 \cdot 10^6$  Дж/кг  
 м/с

Какую скорость можно сообщить телу массой 1 кг, если допустить возможность использовать для этого всю энергию, выделяемую при конденсации одного литра водяных паров, находящихся при нормальном атмосферном давлении и температуре 373 К?

### Решение

При конденсации водяных паров выделяется количество теплоты  $Q = m_{\text{п}} \lambda_{\text{п}}$ , где  $m_{\text{п}}$  – масса водяных паров, а  $\lambda_{\text{п}}$  – удельная теплота парообразования (конденсации) воды, которая берется из таблиц. Масса водяных паров выражается через объем и их плотность (1.31)

$$m_{\text{п}} = \rho V = \frac{pM}{RT} V,$$

где  $M = 18 \cdot 10^{-3}$  кг/моль – это молярная масса водяных паров,  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная.

Поскольку по предположению все количество теплоты, выделяемое при конденсации, используется для сообщения скорости, то согласно закону сохранения энергии  $Q = E_c$  или

$$\frac{pM}{RT} V \lambda_{\text{п}} = \frac{mv^2}{2},$$

откуда

$$v = \sqrt{\frac{2pVM\lambda_{\text{п}}}{mRT}}; \quad v \approx 51 \text{ м/с} \approx 184 \frac{\text{км}}{\text{ч}}.$$

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что такое парообразование и в каком виде оно реализуется?
2. Объясните с точки зрения молекулярно-кинетической теории механизм испарения.
3. Что представляет собой динамическое равновесие между жидкостями и парами?
4. Какие пары называют насыщенными? Каковы их свойства?
5. Чем отличаются ненасыщенные пары от насыщенных?
6. Что представляет собой влажность воздуха? Дайте определение абсолютной и относительной влажности.

7. Что называется точкой росы?
8. Опишите принцип действия конденсационного гигрометра и психрометра.
9. Что представляет собой кипение и как его объяснить с помощью молекулярно-кинетической теории?
10. Дайте определение температуры кипения. Как она зависит от внешнего давления?
11. Дайте определение удельной теплоты парообразования.
12. Определите абсолютную влажность воздуха при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $60\%$  (см. таблицу на стр. 115).
13. Определите относительную влажность воздуха с температурой  $30^{\circ}\text{C}$ , если точка росы равна  $15^{\circ}\text{C}$ . Плотности насыщенных паров при этих температурах равны соответственно  $\rho_{\text{нас.1}} = 0,0304 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{\text{нас.2}} = 0,0128 \text{ кг/м}^3$ .
14. Относительная влажность воздуха в комнате с температурой  $20^{\circ}\text{C}$  равна  $60\%$ . На сколько градусов должна быть ниже температура воздуха за окном, чтобы стекла запотели?
15. Определите количество водяных паров при температуре  $100^{\circ}\text{C}$ , необходимых для нагревания  $50 \text{ кг}$  воды от  $7^{\circ}\text{C}$  до  $77^{\circ}\text{C}$ . (Удельная теплоемкость воды  $c = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , удельная теплота парообразования  $\lambda_{\text{п}} = 2,26 \text{ МДж}/\text{кг}$ .)
16. Вычислите изменение внутренней энергии воды массой  $1 \text{ кг}$  и температурой  $0^{\circ}\text{C}$  при превращении ее в пар с температурой  $100^{\circ}\text{C}$ . (Удельная теплоемкость воды  $c = 4,2 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , удельная теплота парообразования  $\lambda_{\text{п}} = 2,26 \text{ МДж}/\text{кг}$ .)

### 3.7\* ПЛАВЛЕНИЕ И ОТВЕРДЕВАНИЕ. СУБЛИМАЦИЯ И ДЕСУБЛИМАЦИЯ

Переход вещества из твердого состояния в жидкое называется **плавлением**, а обратное превращение из жидкого состояния в твердое называется **отвердеванием** или **кристаллизацией**.

Рассмотрим процесс плавления твердого тела с молекулярно-кинетической точки зрения. Твердые тела характеризуются дальним порядком в расположении молекул в кристаллической решетке. Если телу сообщается извне количество теплоты, то вначале растет как средняя кинетическая энергия молекул (температура), так и потенциальная, потому что растут и скорости молекул и расстояния между ними. Когда полученной энергии будет достаточно для преодоления сил молекулярного притяжения, начнется разрушение кристаллической решетки и превращение твердого тела в жидкость, то есть плавление. С этого момента вся передаваемая энергия расходуется на разрушение кристаллической решетки (растет потенциальная энергия взаимодействия молекул), температура вещества остается постоянной. Эта температура называется **температурой плавления**  $T_0$  (рис. 3.25, а). После завершения процесса плавления передаваемая теплота расходуется на рост кинетической энергии (скорости) молекул вещества уже в жидком состоянии и, следовательно, растет его температура.

Аналогично объясняется и ход обратного процесса – затвердевания (рис. 3.25, б). При охлаждении вещества в жидком состоянии выделяется определенное количество теплоты во внешнюю среду, пока его температура не достигнет температуры плавления  $T_0$ , при которой начнется процесс кристаллизации. Вещество продолжает

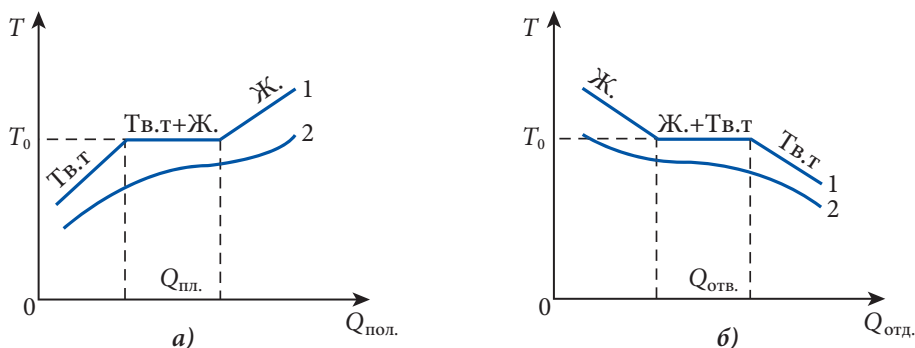


Рис. 3.25

отдавать тепло во внешнюю среду, температура остается постоянной до тех пор, пока молекулярные силы не восстановят полностью кристаллическую решетку. После завершения процесса затвердевания температура твердого тела уменьшается за счет отдачи соответствующего количества теплоты в окружающую среду другим телам.

Как показывает эксперимент, у аморфных тел нет температуры плавления (рис. 3.25, кривая 2). При нагревании они постепенно размягчаются и с ростом температуры превращаются в жидкости.

Количество теплоты, необходимое для плавления единицы массы некоторого вещества, взятого при температуре плавления, называется **удельной теплотой плавления**:

$$\lambda_{\text{пл.}} = \frac{Q_{\text{пл.}}}{m}. \quad (3.27)$$

Она зависит от природы вещества и внешнего давления, измеряется в СИ в Дж/кг.

Так как количество теплоты, выделяющееся при затвердевании, равно необходимому для плавления  $Q_{\text{пл.}}$ , то, значит, и удельная теплота затвердевания численно равна удельной теплоте плавления  $\lambda_{\text{пл.}}$ . Итак, количество теплоты, поглощаемое (выделяемое) при плавлении (затвердевании) некоторой массы  $m$  вещества, равно:

$$Q_{\text{пл.}} = \lambda_{\text{пл.}} \cdot m. \quad (3.28)$$

Установлено, что температура плавления (затвердевания) зависит от давления. Например, из-за очень малой площади контакта коньков со льдом конькобежец оказывает значительное давление и лед тает под лезвиями коньков при температуре меньше  $0^{\circ}\text{C}$ . Образуется очень тонкий слой воды, улучшающий скольжение (смазка).

Если при плавлении вещество расширяется, то увеличение внешнего давления приводит к росту температуры плавления (рис. 3.26, а), а если сжимается – к ее уменьшению (рис. 3.26, б). Отметим, что только очень большие давления могут за-

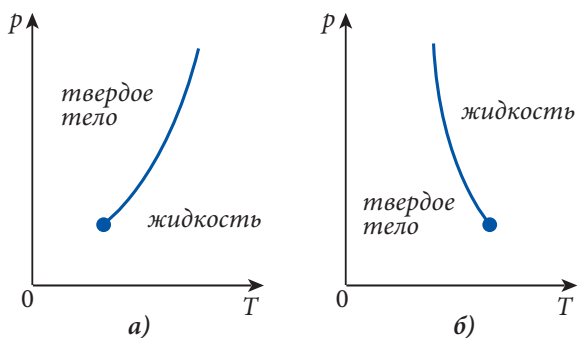


Рис. 3.26

метно изменить температуру плавления. Например, чтобы понизить температуру плавления льда на  $1^\circ\text{C}$ , необходимо повысить давление на  $1,3 \cdot 10^7$  Па ( $\sim 130$  атм).

В природе существует ряд твердых веществ, обладающих запахом (нафталин, сера, йод и т.д.). Значит, в воздухе имеются пары этих веществ, образовавшиеся непосредственно из твердого состояния.

**Процесс перехода из твердого состояния в газообразное называется сублимацией (возгонкой), а обратный – десублимацией.**

Эти процессы очень легко наблюдать в случае льда. Зимой благодаря сублимации высыхает вывешенное на морозе белье, а “узоры”, возникающие на стеклах окон в морозные дни, образуются вследствие десублимации паров воды из воздуха.

Понятно, что для сублимации тело поглощает количество теплоты, равное сумме количества теплоты, необходимого для плавления и парообразования получившейся жидкости.

$$Q_c = Q_{\text{пл.}} + Q_{\text{п}} = \lambda_c \cdot m, \quad (3.29)$$

где  $\lambda_c$  – удельная теплота сублимации.

Из формул (3.25), (3.28) и (3.29) следует, что

$$\lambda_c = \lambda_{\text{пл.}} + \lambda_{\text{п.}} \quad (3.30)$$

Так как десублимация обратна сублимации, то численно выделившаяся энергия находится тоже по формуле (3.30).

Давление насыщенных паров, образовавшихся из твердых тел, зависит от температуры таким же образом, как давление насыщенных паров, образовавшихся из жидкости (рис. 3.27). Эта зависимость имеет значительно меньший наклон, потому что при нагревании на один градус число молекул, покинувших твердое тело, много меньше числа молекул, покидающих жидкость. В результате давление насыщенных паров над твердым телом много меньше, чем над жидкостью.

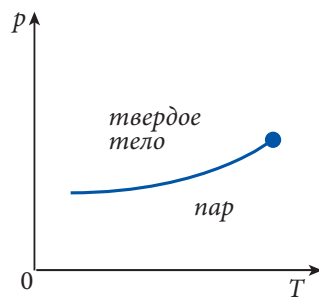


Рис. 3.27

В зависимости от внешних условий вещество может существовать в различных агрегатных состояниях или фазах. Как показывает опыт, вещество, взятое при низких давлениях и высоких температурах находится в газообразном состоянии, при высоких давлениях и низких температурах – в твердом состоянии, а при средних значениях давления и температуры – в жидком. Итак, фазовые превращения вещества определяются изменениями температуры и давления, а условие сосуществования фаз выражается зависимостью между этими параметрами.

График зависимости давления от температуры описывает превращения вещества и называется **диаграммой состояния или диаграммой равновесия фаз**. Соответствующие диаграммы уже были построены когда изучались двухфазные превращения: жидкость–газ (рис. 3.24), твердое тело–жидкость (рис. 3.26) и твердое тело–газ (рис. 3.27). Если для какого-либо вещества объединить все диаграммы двухфазных превращений, то получится диаграмма состояния этого вещества. На рис. 3.28 качественно показаны

характерные диаграммы для веществ, расширяющихся при плавлении (а) и уменьшающих при плавлении свой объем (б). Напомним, что газ и пар – это одно и то же газообразное состояние вещества.

Кривые  $BT$ ,  $KT$  и  $OT$  представляют собой линии равновесия фаз. Они соответствуют условиям сосуществования (равновесия) двух фаз вещества: кривая  $BT$  – равновесию вещества в твердом и жидком состоянии, кривая  $KT$  – равновесию жидкости и газа,  $OT$  – равновесию тела в твердой фазе и его паров.

Каждая точка на диаграмме, кроме находящихся на упомянутых выше кривых, соответствует одной фазе равновесного состояния вещества. Так, область слева от кривой  $OTB$ , соответствует твердой фазе, ограниченная кривой  $BTK$  – жидкой фазе, а область справа от кривой  $OTK$  – газообразной фазе.

На всех диаграммах состояния есть характерные точки, вполне определенные для каждого данного вещества. Точка  $K$  с параметрами  $(p_K, T_K)$  соответствует **критическому состоянию** вещества, а точка  $T$ , называемая **тройной точкой**, с координатами  $(p_T, T_T)$ , представляет собой уникальное состояние вещества, в котором сосуществуют все три фазы: твердая, жидкая и газообразная.

Отметим, что тройная точка состояния воды используется для определения единицы температуры в СИ:

**Кельвин** – это  $1/273,16$  часть термодинамической температуры тройной точки воды.

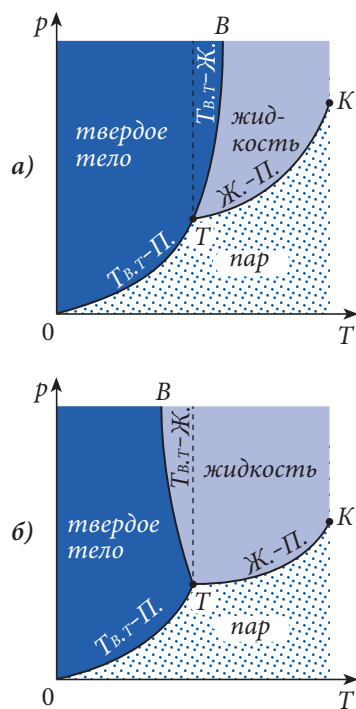


Рис. 3.28

### Пример решения задачи

<b>Дано:</b>	СИ:
$R = 5 \text{ см},$	$5 \cdot 10^{-2} \text{ м},$
$h = 6 \text{ см}$	$6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$
$t - ?$	К

Железный шар радиусом 5 см, предварительно нагретый до определенной температуры, поместили на кусок льда, находящийся при температуре плавления. В результате, шар полностью погружается в лед, при этом центр его оказывается на глубине  $h = 6 \text{ см}$  (рис. 3.29). Пренебрегая нагреванием образовавшейся при плавлении льда воды, найдите, до какой температуры был нагрет шар?

### Решение

Поскольку нагреванием воды пренебрегают, то все тепло, выделяемое шаром при остывании, расходуется на плавление льда:

$$Q_1 = m_1 \lambda_{\text{пл.}} = \rho_1 V_1 \lambda_{\text{пл.}},$$

где  $\rho_1 = 0,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $\lambda_{\text{пл.}} = 3,35 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$  – это плотность и удельная теплота плавления льда, а  $m_1$  и  $V_1$  – масса и объем расплавленного льда. Из рисунка 3.29 видно, что объем расплавленного льда состоит из объема цилиндра высотой  $h$  и половины сферы

радиусом  $R$ :

$$V_1 = \pi R^2 h + \frac{2}{3} \pi R^3 = \frac{1}{3} \pi R^2 (3h + 2R).$$

Таким образом, тепло, поглощенное при плавлении льда, равно

$$Q_1 = \frac{1}{3} \pi R^2 (3h + 2R) \rho_1 \lambda_{\text{пл.}}$$

Количество теплоты, отданное нагретым шаром

$$Q_2 = m_2 c (T - T_0) = \rho_2 V_2 c \Delta T = \frac{4}{3} \rho_2 \pi R^3 c \Delta T,$$

где  $\rho_2 = 7,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $c = 460 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  – это плотность и удельная теплоемкость железа, из которого сделан шар,  $m_2$  и  $V_2$  – масса и объем шара,  $\Delta T = T - T_0$  – изменение температуры от  $T$ , до которой был нагрет шар, до температуры плавления льда  $T_0 = 273 \text{ К}$ .

Согласно закону сохранения энергии,  $Q_1 = Q_2$  или

$$\frac{1}{3} \pi R^2 (3h + 2R) \rho_1 \lambda_{\text{пл.}} = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_2 c \Delta T,$$

откуда

$$\Delta T = \frac{(3h + 2R) \rho_1 \lambda_{\text{пл.}}}{4R \rho_2 c}; \Delta T \approx 116 \text{ К}.$$

Изменение температуры по шкалам Цельсия и Кельвина одинаково,  $\Delta t = \Delta T$ , а первоначальная температура льда была  $0^\circ\text{C}$ , следовательно, шар был нагрет до  $t = 116^\circ\text{C}$ .

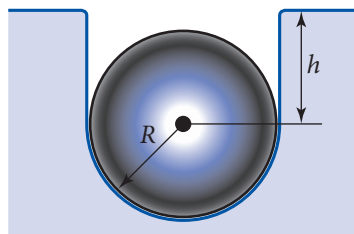


Рис. 3.29

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что представляют собой плавление и кристаллизация?
2. Объясните механизм плавления с помощью молекулярно-кинетической теории.
3. Что называется удельной теплотой плавления (затвердевания)?
4. Что представляет собой температура плавления и как она зависит от давления?
5. Что представляют собой процессы сублимации и десублимации?
6. Как вычисляется удельная теплота сублимации (десублимации)?
7. Что представляет собой диаграмма состояния вещества?
8. Что такое тройная точка вещества?
9. В кубик льда массой 20 г, находящийся при температуре плавления, попадает пуля массой 9 г, которая летела с некоторой скоростью. Найти эту скорость, если известно, что треть энергии пули расходуется на дробление льда, а остальная – на его плавление. Удельная теплота плавления льда  $\lambda_{\text{пл.}} = 335 \text{ кДж/кг}$ .
10. Свинцовая пуля, летящая со скоростью 450 м/с, ударяется о перпендикулярную стену и полностью плавится. Чему была равна температура пули до удара, если на нагревание и плавление израсходована половина ее механической энергии? Удельная теплота плавления, удельная теплоемкость и температура плавления свинца равны  $\lambda_{\text{пл.}} = 25 \text{ кДж/кг}$ ,  $c = 130 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  и  $T_{\text{пл.}} = 600 \text{ К}$ , соответственно.

## 3.8\* КАЛОРИМЕТРИЯ. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА

Одним из следствий первого закона термодинамики является уравнение теплового баланса, лежащее в основе **калориметрии**.

Калориметрия – это ветвь экспериментальной физики, в которой измеряются количества теплоты, сопровождающие различные тепловые процессы, и соответствующие характеристики.

Могут определяться: удельная теплоемкость (характеризует процесс изменения температуры), удельная теплота плавления, парообразования (характеризуют фазовые переходы), теплоты, сопровождающие химические реакции (например, теплота сгорания топлива), и т.д.

В процессе осуществления измерений очень важно избежать влияния неконтролируемого теплообмена между системой изучаемых тел и внешней средой, то есть необходима их адиабатная изоляция. С этой целью система изучаемых тел помещается в **калориметр** – прибор, обеспечивающий упомянутые условия. Он состоит из двух сосудов (рис. 3.30) – внутреннего 1 и внешнего 2. Внутренний сосуд находится на термоизолирующей подставке 3 (пробка, дерево, пластмасса). Крышка сосуда 4 тоже сделана из термоизолирующего вещества, через одно отверстие в которой устанавливается термометр 5, а через другое проходит вал мешалки 6. Внутренний сосуд заполняется частично жидкостью 7, обычно водой, для облегчения теплообмена между телами в калориметре. Вращение мешалки, сопровождаемое ее перемещением вверх-вниз, обеспечивает быстрое выравнивание температур внутри калориметра.

Воздух в пространстве между сосудами калориметра, имея низкую теплопроводность, обеспечивает пониженный теплообмен с внешней средой. Теплообмен будет еще меньше, если воздух между сосудами будет полностью выкачан. Этот метод был предложен и реализован английским физиком Д. Дьюаром (1842–1923), первым получившим жидкий и твердый водород.

Дьюар сконструировал сосуд с двойными стенками из стекла, с посеребренными внутренними поверхностями, чтобы уменьшить теплообмен излучением. Из пространства между стенками воздух выкачан (рис. 3.31). Вакуум не обладает теплопроводностью, нет и конвекции. Такой сосуд, называемый сосудом Дьюара, лучше обычного калориметра. Сосуд Дьюара – главная часть термоса.

Проследим, что происходит в калориметре после того, как туда поместили тела разной температуры.

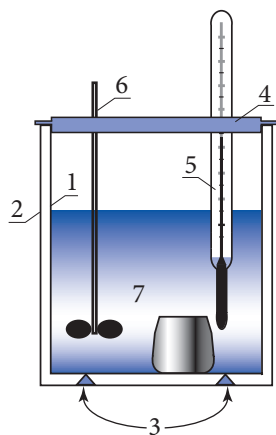


Рис. 3.30

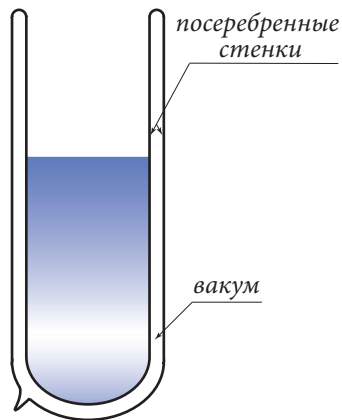


Рис. 3.31

В результате теплообмена между ними, система тел переходит со временем в состояние теплового равновесия с жидкостью с одинаковой температурой во всех ее точках, называемой **равновесной температурой** (обозначается через  $\theta$ ).

Это явление (переход в состояние теплового равновесия) лежит в основе калориметрии, как и **уравнение теплового баланса**, полученное из первого закона термодинамики.

В опытах с калориметром ни система тел, ни каждое тело в отдельности не совершают механическую работу, кроме того, система тел не обменивается теплом с внешней средой. В этом случае ( $A_{\text{сист.}} = 0$  и  $Q_{\text{сист.}} = 0$ ) изменение внутренней энергии системы равно нулю:  $\Delta U_{\text{сист.}} = 0$ . Но внутренняя энергия системы равна сумме внутренних энергий составляющих ее частей:  $U_{\text{сист.}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ . Следовательно, сумма изменений внутренних энергий тел в калориметре равна нулю:

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \dots + \Delta U_n = 0. \quad (3.31)$$

Так как тела в калориметре не совершают механическую работу, то из первого закона термодинамики следует:  $Q_1 = \Delta U_1$ ,  $Q_2 = \Delta U_2$ , ...  $Q_n = \Delta U_n$ , а уравнение (3.31) принимает вид:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0. \quad (3.32)$$

Это и есть **уравнение теплового баланса**:

**Алгебраическая сумма количеств теплоты, которыми обмениваются тела в замкнутой системе, равна нулю.**

Уравнение теплового баланса может быть записано и в другой форме, чаще используемой для расчетов. Обозначим сумму всех положительных членов из (3.32), то есть сумму всех полученных количеств теплоты через  $Q_{\text{пол.}}$ , а сумму всех отрицательных членов, то есть отданных количеств теплоты, через  $Q_{\text{отд.}}$ . Получим

$$Q_{\text{пол.}} + Q_{\text{отд.}} = 0, \quad (3.33)$$

где  $Q_{\text{пол.}} > 0$  и  $Q_{\text{отд.}} < 0$ , следовательно:

$$Q_{\text{пол.}} = |Q_{\text{отд.}}|. \quad (3.34)$$

**Сумма всех количеств теплоты, полученных одними телами в калориметре, равна абсолютной величине суммы количеств теплоты, отданных другими телами в калориметре.**

Рассмотрим пример калориметрического метода определения удельной теплоемкости твердого тела. Обозначим через  $m_1$  массу жидкости в калориметре, чаще всего воды, и через  $c_1$  удельную теплоемкость жидкости, через  $m_k$ ,  $m_m$  и  $m_t$  массы внутреннего сосуда калориметра, мешалки и термометра, через  $c_k$ ,  $c_m$  и  $c_t$  – соответствующие удельные теплоемкости. Все эти тела находятся при температуре  $t_1$ , показываемой термометром. В калориметр вводится тело массой  $m_2$  из вещества, удельную теплоемкость которого  $c_x$  надо определить. Температура  $t_2$  тела известна. Допустим, что  $t_2 > t_1$ . Тело остывает в калориметре и через какое-то время в нем устанавливается температура  $\theta$ .



У жидкости, внутреннего сосуда, мешалки и термометра увеличивается температура от  $t_1$  до  $\theta$  за счет полученного количества теплоты:

$$Q_{\text{пол.}} = (m_1 c_1 + m_k c_k + m_m c_m + m_t c_t)(\theta - t_1).$$

Видно, что величина :

$$C = m_k c_k + m_m c_m + m_t c_t \quad (3.35)$$

постоянна для данного калориметра, не зависит от жидкости или введенных в него тел и их температуры. Очевидно, что величина  $C$  – это теплоемкость калориметра.

Итак, полученное количество теплоты

$$Q_{\text{пол.}} = (m_1 c_1 + C)(\theta - t_1). \quad (3.36)$$

Тело, введенное в калориметр, изменяет свою температуру от  $t_2$  до  $\theta$  и отдает количество теплоты

$$Q_{\text{отд.}} = m_2 c_x (\theta - t_2). \quad (3.37)$$

Подставив эти два выражения в уравнение теплового баланса (3.33), получим

$$(m_1 c_1 + C)(\theta - t_1) + m_2 c_x (\theta - t_2) = 0,$$

откуда выразим неизвестную удельную теплоемкость

$$c_x = \frac{(m_1 c_1 + C)(\theta - t_1)}{m_2 (t_2 - \theta)}. \quad (3.38)$$

Тот же результат мы получим, если подставим  $|Q_{\text{отд.}}| = m_2 c_x (t_2 - \theta)$  в уравнение (3.34).

В случае определения удельной теплоты плавления надо учесть тот факт, что при плавлении тело получает количество теплоты  $Q_{\text{пл.}} = m \lambda_{\text{пл.}}$ , где  $\lambda_{\text{пл.}}$  – удельная теплота плавления, а при отвердевании это количество теплоты отдается, то есть должно быть взято со знаком минус. Такая же ситуация возникает при испарении, когда жидкость получает количество теплоты  $Q_{\text{п.}} = m \lambda_{\text{п.}}$ , где  $\lambda_{\text{п.}}$  – удельная теплота парообразования, а при конденсации это количество теплоты отдается.

Рассмотрим опыт по определению удельной теплоты парообразования воды. С этой целью в калориметр, содержащий массу  $m_1$  воды (удельная теплоемкость  $c_1$  и температура  $t_1$ ), вводятся пары при температуре кипения воды  $t_{\text{кип.}} = 100$  °С при нормальном атмосферном давлении. Через некоторое время доступ паров в калориметр прекращается и записывается показание термометра  $\theta$ . Масса  $m_2$  паров воды определяется взвешиванием внутреннего сосуда калориметра до и после введения паров в него.

Используя те же обозначения параметров начального состояния калориметра, что и в предыдущем опыте, полученное количество теплоты запишем как в формуле (3.36). Это же количество теплоты будет отдано в результате конденсации паров массой  $m_2$  при температуре кипения  $t_{\text{кип.}}$ , остывания получившейся воды до температуры  $\theta$ . Следовательно,

$$Q_{\text{отд.}} = -m_2 \lambda_{\text{п.}} + m_2 c_1 (\theta - t_{\text{кип.}}),$$

а абсолютная величина будет

$$|Q_{\text{отд.}}| = m_2 \lambda_{\text{п.}} + m_2 c_1 (t_{\text{кип.}} - \theta). \quad (3.39)$$

Подставив (3.36) и (3.39) в уравнение теплового баланса (3.34), получим:

$$(m_1 c_1 + C)(\theta - t_1) = m_2 \lambda_{\text{пл}} + m_2 c_1 (t_{\text{кип}} - \theta),$$

Откуда выразим искомую величину:

$$\lambda_{\text{пл}} = \frac{1}{m_2} (m_1 c_1 + C)(\theta - t_1) - c_1 (t_{\text{кип}} - \theta). \quad (3.40)$$

Знание тепловых характеристик вещества имеет большое значение. Например, разработка технологии получения искусственных алмазов была бы невозможна без знания тепловых свойств углерода.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какие важные условия должны обеспечиваться в калориметре для тел, находящихся внутри него?
2. В каком калориметре – с мешалкой или без нее – тепловое равновесие быстрее установится?
3. Как влияет продолжительность интервала времени, за который устанавливается тепловое равновесие, на точность калориметрических измерений? Аргументируйте ответ.
4. В калориметре находится  $m_1 = 0,8$  кг воды при температуре  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ . После того, как долили  $m_2 = 0,6$  кг холодной воды, температура в калориметре достигла  $\theta = 56^\circ\text{C}$ . Чему была равна температура холодной воды? Теплоемкостью калориметра пренебрегаем.
5. Для определения удельной теплоемкости вещества, из которого сделан внутренний сосуд калориметра, был проведен следующий опыт: измерили массу сосуда  $m_{\text{к}} = 0,2$  кг, в него налили  $m_1 = 0,1$  кг воды, измерили их температуру  $t_1 = 18^\circ\text{C}$ , затем в калориметр долили  $m_2 = 0,15$  кг воды при температуре  $t_2 = 57^\circ\text{C}$  и измерили температуру, установившуюся в калориметре:  $\theta = 38^\circ\text{C}$ . На основании этих данных найдите искомую удельную теплоемкость. Удельная теплоемкость воды  $c_{\text{в}} = 4,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг · К).
6. Вычислите удельную теплоемкость жидкости, используя данные опыта: масса латунного внутреннего сосуда калориметра  $m_{\text{к}} = 0,15$  кг, масса жидкости в калориметре  $m_1 = 0,1$  кг; температура в калориметре  $t_1 = 18^\circ\text{C}$ . После того, как в калориметр ввели стальной предмет массой  $m_2 = 0,3$  кг при температуре  $t_2 = 70,6^\circ\text{C}$ , в нем установилась общая температура  $\theta = 36^\circ\text{C}$ . Известны удельные теплоемкости: латуни –  $c_{\text{л}} = 380$  Дж/(кг · К) и стали  $c_{\text{ст.}} = 470$  Дж/(кг · К). Чему равна удельная теплоемкость жидкости?
7. Калориметр из цинка массой  $m_{\text{ц}} = 0,2$  кг содержит  $m_1 = 0,4$  кг воды при температуре  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ . После введения в него тела из серебра массой  $m_2 = 0,5$  кг при температуре  $t_2 = 92,4^\circ\text{C}$  температура воды в калориметре достигла  $\theta = 22^\circ\text{C}$ . Зная удельную теплоемкость воды  $c_{\text{в}} = 4\,200$  Дж/(кг · К) и цинка  $c_{\text{ц}} = 400$  Дж/(кг · К), найдите удельную теплоемкость серебра.
8. В калориметр, содержащий  $m_1 = 0,9$  кг льда при  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ , было введено минимальное количество водяных паров при  $t_2 = 100^\circ\text{C}$ , необходимое для расплавления всего льда. Чему равна масса воды в калориметре сразу после того, как весь лед растаял? Удельная теплота плавления льда  $\lambda_{\text{пл.}} = 334 \cdot 10^3$  Дж/кг, удельная теплоемкость воды  $c_{\text{в}} = 4,19 \cdot 10^3$  Дж/(кг · К), удельная теплота парообразования воды  $\lambda_{\text{пар.}} = 2\,260 \cdot 10^3$  Дж/кг. Теплоемкостью калориметра пренебрегаем.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА

<b>Цель работы:</b>	Определить удельную теплоту плавления льда с помощью калориметра с водой.
<b>Приборы и материалы:</b>	калориметр, мензурка, сосуд с горячей водой, кусочки льда.

## Краткая теория

В калориметр массой  $m_k$  при температуре  $t_k$  наливается вода массой  $m_1$  при температуре  $t_1$ , а затем опускается кусочек льда массой  $m_2$  при температуре  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . После полного плавления льда в калориметре устанавливается тепловое равновесие с температурой  $t_2$ , которую можно определить из уравнения теплового баланса (3.34) записанного для конкретной ситуации в нашей лабораторной работе при помощи уравнений (2.16) и (3.28):

$$m_2\lambda + m_2c(t_2 - t_0) = m_1c(t_1 - t_2) + m_k c_k(t_k - t_2), \quad (3.41)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота плавления льда,  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $m_k$ ,  $c_k$  и  $t_k$  – соответственно масса, удельная теплоемкость и начальная температура калориметра. Если температуру  $t_2$  постепенным добавлением кусочков льда довести до начальной температуры калориметра  $t_k$ , то уравнение теплового баланса (3.41) станет проще:

$$m_2\lambda + m_2c(t_2 - t_0) = m_1c(t_1 - t_2). \quad (3.42)$$

Так как  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ , то для нахождения удельной теплоты плавления льда из (3.42) получим выражение:

$$\lambda = c \left[ \frac{m_1}{m_2}(t_1 - t_2) - t_2 \right].$$

## Ход работы:

1. Приготовьте кусочки льда с температурой  $0^\circ\text{C}$ . Для этого раздробленный на кусочки лед оставьте в каком-нибудь сосуде, пока льдинки не начнут плавиться в воде, получившейся при частичном плавлении льда (15÷20 мин).
2. Измерьте с помощью термометра температуру воздуха в классе; она совпадает с начальной  $t_k$  и конечной температурой  $t_2$  в опыте.
3. Налейте в мензурку 100÷150 мл воды, взятой при температуре на  $30\div 40^\circ\text{C}$  выше, чем температура в классе. Используя связь между массой и объемом, найдите массу горячей воды  $m_1 = \rho V_1$ , взятой для эксперимента (плотность воды  $\rho = 1\,000\text{ кг/м}^3$ ).
4. Измерьте температуру  $t_1$  горячей воды массой  $m_1$  в мензурке и перелейте во внутренний сосуд калориметра.
5. Осушите кусочек льда фильтровальной бумагой и опустите в воду сосуда калориметра: Перемешивайте мешалкой, заметьте температуру смеси после полного плавления кусочка льда. Продолжайте опускать кусочки льда пока равновесная температура  $t_2$  смеси не достигнет начальной температуры калориметра  $t_k$ , она же температура воздуха в классе.
6. Вылейте воду из калориметра в мензурку (без льда, если он еще остался в стакане калориметра) и измерьте её объем  $V_2$ . Найдите массу растопившегося льда по возрастанию  $\Delta V = V_2 - V_1$  объема воды, то есть  $m_2 = \rho\Delta V$ .

7. Впишите все данные и результаты в таблицу:

$t_1$ (°C)	$m_1$ (кг)	$t_2$ (°C)	$\Delta V$ (м <sup>3</sup> )	$m_2$ (кг)	$\lambda$ (кДж/кг)	$c$ (кДж/(кг · К))	$\lambda_{\text{табл.}}$ (кДж/кг)
						4,19	330

8. Сравните величину удельной теплоты плавления льда  $\lambda$ , полученную из опыта, с известной из таблицы  $\lambda_{\text{табл.}}$ . Определите абсолютную  $\Delta\lambda = |\lambda - \lambda_{\text{табл.}}|$  и относительную

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\text{табл.}}} \cdot 100\% \text{ погрешности.}$$

9. Запишите результат в виде:

$$\lambda_{\text{эксп.}} = (\lambda \pm \Delta\lambda) \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \varepsilon = \dots\%$$

10. Сделайте вывод относительно полученных результатов.

## ВОПРОСЫ

1. Объясните, почему в этой работе не принимается во внимание теплообмен с калориметром.
2. Почему нужно осушивать кусочки льда фильтровальной бумагой?
3. Как объясняется рост погрешностей измерений в случае быстрого выполнения лабораторной работы?

# ТЕСТ ДЛЯ ИТОГОВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

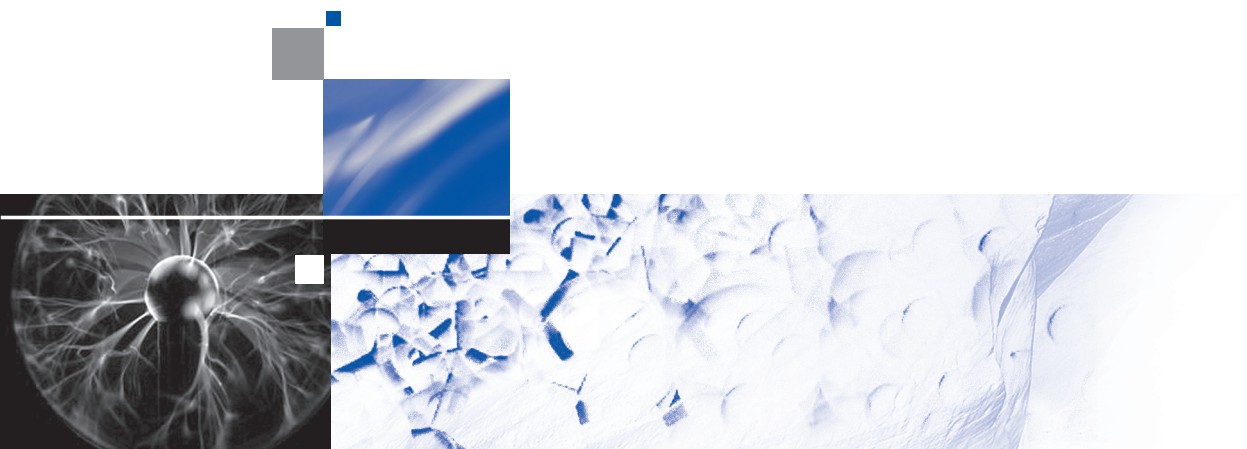
## РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	<b>Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:</b>	
	а) Силы притяжения между молекулами различных сред называются ...	1 б.
	б) Процесс перехода вещества из ... в ... называется испарением.	1 б.
	в) Абсолютная влажность – это величина, равная ..., содержащихся в атмосфере.	1 б.
2	<b>Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно:</b>	
	а) Число молекул в одном моле зависит от количества вещества. <input type="checkbox"/>	1 б.
	б) Аморфные тела при комнатной температуре ведут себя как жидкости с очень малой текучестью. <input type="checkbox"/>	1 б.
	в) Температура кипения жидкости на вершине горы больше, чем у ее подножия. <input type="checkbox"/>	1 б.
	Задания 3 и 4 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).	
3	<b>В одинаковых условиях давления и температуры влажный воздух тяжелее сухого, так как влажный воздух содержит и молекулы воды.</b>	
	<b>Ответ:</b>	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	
4	<b>Ненасыщенные пары жидкости могут стать насыщенными вследствие изохорного охлаждения, так как максимальное давление насыщенных паров уменьшается с уменьшением температуры.</b>	
	<b>Ответ:</b>	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .	
5	<b>Нефть в капиллярной трубке поднялась на 2 см. Чему равен диаметр трубки если поверхностное натяжение и плотность нефти равны соответственно <math>21 \cdot 10^{-3}</math> Н/м и <math>800</math> кг/м<sup>3</sup>?</b>	2 б.
6	<b>На сколько процентов увеличится площадь крыши из цинкового листа при росте ее температуры от 0°C до 40°C? Температурный коэффициент теплового расширения цинка равен <math>2,6 \cdot 10^{-5}</math> К<sup>-1</sup>.</b>	2 б.
7	<b>Капля воды радиусом 2 мм была разделена на две одинаковые. Коэффициент поверхностного натяжения воды <math>\sigma = 0,072</math> Н/м. Определите:</b>	

а) изменение площади свободной поверхности капель;	3 б.
б) механическую работу, совершенную для разделения капель воды.	3 б.

**8** Объем стального шара массой 15,6 кг при 0°C равен  $V_0 = 2\,000\text{ см}^3$ . Шар нагревали до тех пор, пока его объем стал равным  $V = 2\,004,6\text{ см}^3$ , а затем опустили в сосуд с 5-ю кг воды при температуре 18°C. В результате, температура воды увеличилась до 30°C. Удельные теплоемкости стали и воды равны  $c_{ст.} = 460\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  и  $c_{в} = 4\,200\text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ; удельной теплоемкостью сосуда пренебрегают. Определите:

а) температуру, до которой был нагрет шар;	2 б.
б) коэффициент линейного расширения стали;	3 б.
в) изменение плотности стального шара при его остывании.	3 б.



# ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

XIX век, названный **веком электричества**, был отмечен важными открытиями в области физики электрических и магнитных явлений. В 1820 году Ханс Кристиан Эрстед заметил, что магнитная стрелка поворачивается при пропускании электрического тока через проводник, находящийся около нее. Таким образом было установлено, что **электрический ток создает магнитное поле**. Далее, в 1831 году Майкл Фарадей **открыл явление электромагнитной индукции**, которое лежит в основе методов получения электрического тока, используя магнитное поле. Была изучена связь между электрическим и магнитным полями, рассматриваемыми как составляющие **единого электромагнитного поля**. Теория этого поля – **электродинамика** – была разработана в 1860–1865 годах Джеймсом Кларком Максвеллом, который предсказал существование электромагнитных волн и описал их свойства. Электромагнитные волны были впервые экспериментально обнаружены Генрихом Герцем в 1887–1888 годах.

Благодаря этим открытиям были сконструированы: генератор электрического тока, электрический двигатель, телеграф, телефон, радио и т.д.

Первые десятилетия XX века отмечены бурным развитием **атомной физики**. Было установлено, что электромагнитное взаимодействие удерживает вместе частицы в атомах, атомы – в молекулах, а молекулы – в твердых и жидких телах. Исследование электрических свойств полупроводников привело к изобретению **полупроводникового диода**, а затем **транзистора**.

Эти открытия и изобретения, за которыми последовала настоящая революция в электронике, позволили миниатюризировать электронные приборы. В результате, в последние десятилетия была существенно усовершенствована **вычислительная техника**, появились **мобильная телефония, Интернет** и т.д.

# ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## 4.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗАРЯДЫ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА. ЗАКОН КУЛОНА

Вспомним некоторые сведения из области электрических явлений. Фалес Милетский из Древней Греции (ок. 624–547 гг. до Хр.) первым установил, что янтарь, натертый шерстяной тканью, притягивает легкие тела. Про янтарь, обладающий таким свойством, говорят что он **наэлектризован**. **Степень электризации** характеризуется физической величиной, которая называется **электрическим зарядом** и обычно обозначается буквой  $q$ . Единица электрического заряда в СИ называется **кулоном** и имеет символ Кл, т.е.  $[q] = \text{Кл}$ . Определение этой единицы будет дано далее.

Позднее было установлено, что и другие тела могут быть наэлектризованы трением. При изучении взаимодействия наэлектризованных тел было установлено следующее:

**В природе существует два вида электрических зарядов: положительные и отрицательные.**

**Электрические заряды одинакового знака отталкиваются, а противоположного – притягиваются.**

Электрические свойства атомов позволяют объяснить электризацию тел. Согласно модели, предложенной английским физиком Эрнестом Резерфордом (1871–1937) в начале XX века, в центре атома находится **ядро** – массивная, **положительно** заряженная частица, вокруг которой двигаются **электроны** – частицы, имеющие **отрицательный** электрический заряд.

В свою очередь, ядра состоят из частиц двух видов – **протонов** и **нейтронов**. Протоны заряжены положительно, а нейтроны являются нейтральными частицами.

Массы этих частиц равны:  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$  кг,  $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$  кг и  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг. Массы протона и нейтрона приблизительно равны, а масса электрона примерно в 1840 раз меньше.

Протон и электрон имеют одинаковый по величине, но противоположный по знаку электрический заряд. Эта величина – самый маленький электрический заряд, существующий в природе в свободном состоянии. Он называется **элементарным электрическим**



**зарядом** и обозначается буквой  $e$ . Экспериментально установлено, что  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Таким образом, электрический заряд протона  $q_p = +e$ , а электрона  $q_e = -e$ .

Электроны всех существующих в природе элементов одинаковы. Протоны и нейтроны, каждые из них, также идентичны. Ядра же различных химических элементов отличаются друг от друга.

Из факта существования элементарного электрического заряда  $e$  следует, что заряд наэлектризованного тела, называемый **количеством электричества**, является числом, кратным заряду  $e$ , т.е.

$$q = Ne, \tag{4.1}$$

где  $N$  – целое число, положительное или отрицательное. Это означает, что электрический заряд является величиной дискретной.

Электризация тел – это результат перехода электронов от одних тел к другим. **Нейтральное тело, отдавая часть электронов, заряжается положительно, а принимая электроны, заряжается отрицательно.**

Многочисленные эксперименты показывают, что в природе существует определенная закономерность, касающаяся электрических зарядов. Но прежде, чем ее сформулировать, введем новое понятие. Система тел, ограниченная реальной или воображаемой поверхностью, через которую не происходит обмен электрическими зарядами, называется **электрически изолированной системой**.

Упомянутая выше закономерность называется **законом сохранения электрического заряда** и формулируется следующим образом:

**Алгебраическая сумма электрических зарядов тел электрически изолированной системы – величина постоянная (сохраняется со временем):**

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}. \tag{4.2}$$

Закон сохранения электрического заряда – **фундаментальный закон природы**. Он выполняется как для больших, так и для микроскопических тел, какими являются молекулы, атомы и частицы, их составляющие.

Чтобы получить выражение для силы электрического взаимодействия, допустим, что пространственные размеры заряженных тел много меньше, чем расстояния между ними, т.е. ими можно пренебречь. Таким образом мы получили **модель точечного заряженного тела**, которое обычно называется **точечным электрическим зарядом**.

**Наэлектризованное тело, размеры которого пренебрежимо малы по сравнению с расстоянием до других наэлектризованных тел, называется точечным заряженным телом или точечным электрическим зарядом.**

Эта модель применима также для случая равномерно заряженных шаров.

Электрическое взаимодействие точечных зарядов было экспериментально изучено Кулоном с помощью изобретенных им крутильных весов (рис. 4.1), в которых на тонкой

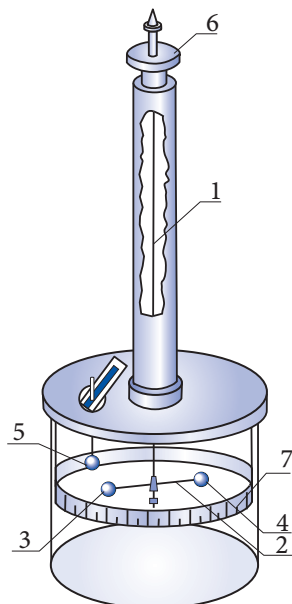


Рис. 4.1

серебряной нити (1) за середину была подвешена стеклянная палочка (2). На одном из ее концов закреплялся шарик из бузины (3), а на другом – противовес (4), который обеспечивал горизонтальное положение палочки. Эта система помещалась внутрь специального сосуда для исключения влияния воздушных потоков. Через верхнюю крышку в сосуд был введен изолированный стержень, имеющий на нижнем конце шарик из бузины (5), расположенный на том же уровне, что и шарик (3). Верхний конец нити был закреплен на головке подвеса (6) так, что нить могла вращаться. Соответствующий угол определялся по градуированной шкале. Если шарики из бузины заряжались одноименно, то они отталкивались и серебряная нить закручивалась. Головку подвеса вращали, чтобы вернуть шарики в первоначальное положение. Угол закручивания определялся по показаниям шкалы (7) на боковой поверхности сосуда и шкалы на головке подвеса.

Зная параметры крутильных весов и величину угла закручивания серебряной нити, Кулон вычислил силу отталкивания шариков из бузины для различных расстояний между ними и зарядов на них. В те времена еще не было методов измерения электрических зарядов. Кулон применил простой прием дробления заряда. При соприкосновении заряженного шарика с таким же незаряженным электрический заряд распределяется поровну между ними.

В результате тщательных измерений Кулон установил зависимость силы взаимодействия точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$  от величины этих зарядов и расстояния  $r$  между ними:

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{r^2}. \quad (4.3)$$

Сила взаимодействия двух неподвижных точечных электрических зарядов прямо пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Силы взаимодействия зарядов расположены вдоль прямой, соединяющей заряды, и направлены в противоположные стороны.

Этот закон называется **законом Кулона**.

Закон Кулона согласуется с принципом действия и противодействия.

**ШАРЛЬ АВГУСТИН КУЛОН**

(1736–1806), ФРАНЦУЗСКИЙ ВОЕННЫЙ ИНЖЕНЕР И ФИЗИК



Проводил научные исследования в области механики, электричества и магнетизма. Сформулировал законы трения скольжения (1781) и качения (1790); изучал деформацию кручения металлических нитей, установил связь между силой закручивания нити, коэффициентом упругости, размерами нити и углом закручивания. Эти исследования привели к изобретению в 1784 очень чувствительных, пригодных для измерения малых сил крутильных весов. В 1785 году с помощью таких весов Кулон экспериментально установил закон для силы взаимодействия точечных электрических зарядов. В 1788 году использовал эти весы для изучения взаимодействия магнитных полюсов. В честь Кулона закон, определяющий силу взаимодействия точечных зарядов, а также единица электрического заряда носят его имя.

Коэффициент пропорциональности  $k_e$  в формуле (4.3.) зависит от электрических свойств среды, в которой находятся заряды, и от единиц величин, входящих в нее.

Значение этого коэффициента для вакуума в СИ равно:

$$k_e = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

Эта величина может быть использована при решении задач и в случае, когда заряды находятся в воздухе, электрические свойства которого слегка отличаются от свойств вакуума. (Далее мы будем считать, что электрические заряды находятся в вакууме.)

Для силы взаимодействия двух точечных электрических зарядов по 1 Кл каждый, расстояние между которыми равно 1 м, из формулы (4.3) получим  $F = 9 \cdot 10^9$  Н. Это огромная сила, превосходящая силу тяжести египетских пирамид. Этот пример показывает, что кулон – очень большая единица электрического заряда. Поэтому используются его дольные единицы: 1 нКл =  $10^{-9}$  Кл (нанокулон); 1 мкКл =  $10^{-6}$  Кл (микрокулон); 1 мКл =  $10^{-3}$  Кл (милликулон).

Для вакуума коэффициент  $k_e$  выражается через другую константу  $\epsilon_0$ , связанную с ним соотношением:

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (4.4)$$

Константа  $\epsilon_0$  называется *электрической постоянной*. Ее значение:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{1/4\pi k_e} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

Подставив соотношение (4.4) в (4.3), запишем закон Кулона в виде:

$$F = \frac{|q_1| |q_2|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (4.5)$$

Следует отметить, что выражение для закона Кулона подобно выражению для силы гравитационного взаимодействия двух точечных тел:

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (4.6)$$

где  $K$  – гравитационная постоянная. Сравнивая формулы (4.5) и (4.6), устанавливаем, что обе силы обратно пропорциональны квадрату расстояния между взаимодействующими телами. Величина силы гравитационного притяжения прямо пропорциональна произведению масс тел, а кулоновской силы – произведению электрических зарядов тел. Существенным отличием является то, что гравитационные силы – это только силы притяжения, а кулоновские силы могут быть и силами притяжения и отталкивания, в зависимости от знаков взаимодействующих электрических зарядов.

Опыты показывают, что в системе точечных зарядов взаимодействие между любыми двумя зарядами не зависит от наличия других зарядов.

Рассмотрим систему трех точечных зарядов и покажем силы, действующие на один из них, например, на заряд  $q_1$  (рис. 4.2). Сила  $\vec{F}_{12}$  определяется по формуле (4.5) без учета заряда

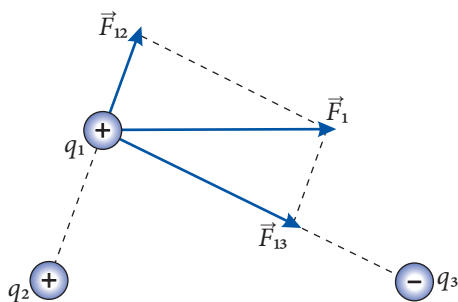


Рис. 4.2

$q_3$ . Подобным же образом определяется сила  $\vec{F}_{13}$ . Результирующая сил, действующих на заряд  $q_1$ , равна:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13}.$$

Если система состоит из большего числа точечных зарядов, результирующая сила, действующая на один из них, например  $q_2$ , равна:

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} + \dots + \vec{F}_{2n}. \quad (4.7)$$

Это соотношение является выражением **принципа суперпозиции (наложения) сил** применительно к кулоновским силам.

### Пример решения задачи

1

#### Дано:

$q_1 = +12 \cdot 10^{-6}$  Кл,  
 $q_2 = +2 \cdot 10^{-6}$  Кл,  
 $q_3 = -9 \cdot 10^{-6}$  Кл,  
 $q_0 = +1,6 \cdot 10^{-6}$  Кл,  
 $AB = 0,08$  м,  
 $\alpha = 30^\circ$ ,  
 $k_e = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>  
 $F = ?$

Три маленьких шарика, несущие заряды  $q_1 = +12$  мкКл,  $q_2 = +2$  мкКл и  $q_3 = -9$  мкКл, находятся в вершинах прямоугольного треугольника (рис. 4.3). Известны длина стороны  $AB = 8$  см и угол  $\alpha = 30^\circ$ . Найдите модуль силы, действующей на маленький шарик, несущий заряд  $q_0 = +1,6$  мкКл и помещенный в точку  $D$  (отрезок  $AD$  перпендикулярен гипотенузе треугольника  $BC$ ).

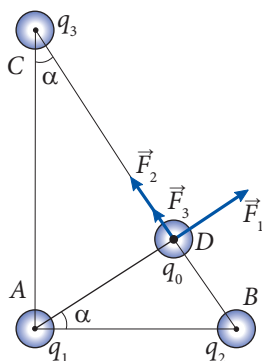


Рис. 4.3

#### Решение

На рисунке 4.3 представлены силы, действующие на шарик в точке  $D$ , с учетом знака зарядов шариков. Из рисунка видно, что силы  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_3$  коллинеарны и перпендикулярны силе  $\vec{F}_1$ . Модуль результирующей силы

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3$$

равен

$$F = \sqrt{F_1^2 + (F_2 + F_3)^2}.$$

Для нахождения величин сил вычислим соответствующие расстояния. Из рисунка 4.3 получаем:

$$BD = AB \sin \alpha = 0,04 \text{ м}; \quad AD = AB \cos \alpha = 0,04\sqrt{3} \text{ м}; \quad CD = CB - BD = \frac{AB}{\sin \alpha} - BD = 0,12 \text{ м}.$$

Подставив в выражение для закона Кулона (4.3) величины электрических зарядов и расстояния между ними, найдем силы:

$$F_1 = 36 \text{ Н}, \quad F_2 = 18 \text{ Н} \quad \text{и} \quad F_3 = 9 \text{ Н}.$$

Результирующая сила, действующая на заряд в точке  $D$ , равна:  $F = 45$  Н.

**Дано:**

$r = 1 \text{ мм},$   
 $\rho = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$   
 $k_e = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2,$   
 $K = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$

**СИ:**

$10^{-3} \text{ м}$

$N - ?$

Два маленьких стальных шарика заряжены идентичными отрицательными электрическими зарядами. Сколько электронов должно находиться на каждом из шариков, чтобы сила их электрического отталкивания уравновешивалась силой всемирного притяжения?

**Решение**

Принимая во внимание (4.1), величины зарядов шариков равны  $q_1 = q_2 = Ne$ . Таким образом, согласно условию задачи, записываем:

$$k_e \frac{N^2 e^2}{l^2} = K \frac{m^2}{l^2},$$

где  $l$  – расстояние между шариками,  $k_e$  и  $K$  – электрическая и гравитационная постоянные, соответственно,  $m = \rho V = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho$  – масса каждого шарика. Итак, получаем:

$$k_e N^2 e^2 = \frac{16}{9} \pi^2 r^6 \rho^2 K,$$

откуда

$$N = \frac{4\pi\rho r^3}{3e} \sqrt{\frac{K}{k_e}}; N \approx 17\,570.$$

**ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

1. Сколько электронов содержится в ионе кислорода  $O^{2-}$ ?
2. Найдите изменение массы тела, получившего положительный электрический заряд, равный 5,6 мКл.
3. Три тела, несущие электрические заряды, равные +2,4 мКл, -8,8 мКл и +1,6 мКл, образуют электрически изолированную систему. В результате некоторых превращений заряды первых двух тел стали равными -3,2 мКл и -0,8 мКл. Чему равен электрический заряд третьего тела?
4. Два одинаковых металлических шара  $A$  и  $B$  имеют заряды  $q_A = +7,2 \text{ мКл}$  и  $q_B = +4,8 \text{ мКл}$ . Шары приведены в соприкосновение, а затем разведены. Чему равны электрические заряды шаров после соприкосновения? Какой из шаров получил электроны и в каком количестве?
5. Заряженный шар находится на оси симметрии заряженного диска радиусом 3 см. Можно ли диск считать точечным телом, если расстояние между его центром и шаром равно: а) 8 см; б) 10 м?
6. Как можно вычислить силу взаимодействия двух заряженных тел, которые нельзя считать точечными?
7. Два точечных заряженных тела взаимодействуют с силой, равной 1,2 мН. Чему станет равной сила взаимодействия тел, если расстояние между ними увеличится в 2 раза, а заряд одного из тел – в 5 раз?

8. Два одинаковых шара с зарядами  $+8$  нКл и  $+2$  нКл взаимодействуют с силой, равной  $1,6$  мН. Шары приведены в соприкосновение, а затем разведены до первоначального расстояния. Чему стала равной сила взаимодействия?
9. Два одинаковых металлических шарика массой  $0,2$  г каждый подвешены на тонких шелковых нитях одинаковой длины, равной  $0,6$  м. Верхние концы нитей закреплены в одной точке. Шарик заряжены одинаковыми зарядами. Определите величины этих зарядов, если вследствие отталкивания шариков нити подвеса образуют угол, равный  $60^\circ$ .

## 4.2 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Английский химик и физик Майкл Фарадей (1791–1867) установил, что взаимодействие электрических зарядов осуществляется посредством особого вида материи, которая была названа **электрическим полем**. Таким образом, каждое заряженное тело создает вокруг себя электрическое поле, действующее на другие заряженные тела, помещенные в это поле. Для системы, состоящей из двух заряженных тел, считается, что каждое из них находится в электрическом поле, создаваемом другим телом. Согласно принципу действия и противодействия, силы, действующие на тела, равны по величине и направлены вдоль одной прямой, но в противоположные стороны.

Электрические поля, создаваемые неподвижными зарядами, называются **электростатическими полями**. В этой главе рассматриваются только электростатические поля, их часто называют просто **электрическими полями**.

Гипотеза существования материальных полей уже была использована для описания всемирного тяготения тел посредством **гравитационного поля**.

Электрическое поле действует на помещенные в него заряженные тела. Если на заряженное тело, расположенное в каком-то месте пространства, действует электрическая сила, это означает, что в данном месте существует электрическое поле. Следовательно, для исследования электростатического поля можно использовать **пробные наэлектризованные тела**, называемые **пробными зарядами**. Эти заряды должны быть точечными, что позволяет проводить исследования свойств поля в малых областях, т.е. исследовать более детально. Величина пробного заряда должна быть малой, чтобы не изменять изучаемого поля, не перемещать электрические заряды, его создающие.

Пробный заряд условно принято считать положительным.

Исследуем электрическое поле точечного заряда  $q$ . Точечный заряд  $q_0$  помещен в точку  $P$ , расположенную на расстоянии  $r$  от заряда  $q$  (рис. 4.4). Согласно закону Кулона на него действует электрическая сила:

$$F = k_e \frac{|q| \cdot q_0}{r^2}.$$

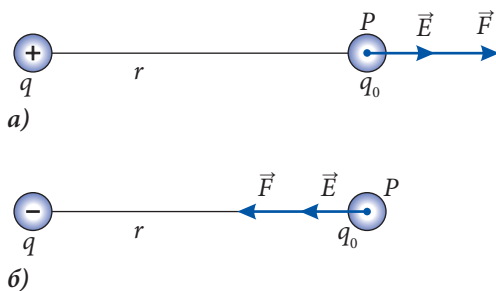


Рис. 4.4

Возьмем отношение:

$$\frac{F}{q_0} = k_e \frac{|q|}{r^2}. \quad (4.8)$$

Как видно, это отношение (4.8) не зависит от заряда  $q_0$ , помещенного в точку  $P$ , а зависит только от заряда  $q$ , создающего поле, и от положения точки  $P$  в этом поле. Следовательно, отношение (4.8) является характеристикой электрического поля в данной точке, которая называется **напряженностью электрического поля** и обозначается  $\vec{E}$ .

Итак, согласно определению:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (4.9)$$

**Напряженность электрического поля в данной точке – векторная величина, равная отношению силы, действующей на точечный заряд, помещенный в эту точку, к величине заряда.**

Это определение было сформулировано в результате исследования электрического поля точечного заряда, но оно справедливо для любого электрического поля.

Единица напряженности электрического поля

$$[E] = \frac{[F]}{[q_0]} = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

Как следует из определения (4.9), знание напряженности электрического поля позволяет вычислять силу, действующую на точечный заряд, находящийся в соответствующей точке поля:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}. \quad (4.10)$$

Поэтому говорят, что напряженность  $\vec{E}$  является *силовой характеристикой* электрического поля.

Из формул (4.8) и (4.9) получаем выражение для напряженности электростатического поля точечного заряда в вакууме (воздухе):

$$E = k_e \frac{|q|}{r^2} \quad \text{или} \quad E = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (4.11)$$

Здесь принята во внимание формула (4.4), выражающая связь между  $k_e$  и  $\epsilon_0$ .

Видно, что напряженность электростатического поля точечного заряда прямо пропорциональна величине этого заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния от него.

Как следует из определения (4.9), направление вектора напряженности  $\vec{E}$  совпадает с направлением силы, действующей на положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля (рис. 4.4). Таким образом, напряженность электростатического поля, создаваемого положительным точечным зарядом, направлена радиально от заряда (рис. 4.4, а), а отрицательным – радиально к заряду (рис. 4.4, б).

Исследуем электростатическое поле, создаваемое несколькими зарядами, например тремя точечными зарядами (рис. 4.5). Они действуют на пробный заряд  $q_0$ , помещенный в произвольную точку  $P$ , с силами  $\vec{F}_1$ ,  $\vec{F}_2$  и  $\vec{F}_3$ , которые могут быть выражены через напряженности полей, создаваемых каждым из зарядов в отдель-

ности:  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$  и  $\vec{E}_3$ . Согласно формуле (4.10) записываем:

$$\vec{F}_1 = q_0 \vec{E}_1; \quad \vec{F}_2 = q_0 \vec{E}_2; \quad \vec{F}_3 = q_0 \vec{E}_3.$$

Результирующая сила, приложенная к пробному заряду, равна векторной сумме сил, действующих со стороны каждого из зарядов (см. формулу 4.7):

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = q_0 (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3).$$

С другой стороны, результирующая сила  $\vec{F}$  и напряженность результирующего электростатического поля  $\vec{E}$  связаны соотношением  $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ . Сравнивая оба выражения для силы  $\vec{F}$ , получаем:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3. \quad (4.12)$$

Напряженность электрического поля, создаваемого в данной точке пространства системой точечных зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждым из зарядов в отдельности.

Это утверждение называется **принципом суперпозиции электрических полей**.

Для наглядного изображения электростатического поля Фарадей ввел в рассмотрение **линии напряженности электрического поля**, называемые также **силовыми линиями поля**.

**Линией напряженности электрического поля** называется воображаемая линия, касательные к которой в каждой точке совпадают с направлением вектора напряженности  $\vec{E}$  в каждой из этих точек (рис. 4.6).

Таким образом, линии напряженности приписывают направление, совпадающее с направлением вектора  $\vec{E}$ . В каждой точке поля вектор  $\vec{E}$  является величиной строго определенной. Значит, через каждую точку поля может проходить только одна линия напряженности и, следовательно, две и более линий не пересекаются.

Рассмотрим линии напряженности некоторых конкретных электростатических полей. Известно, что напряженность электрического поля точечного заряда направлена радиально. Такое же направление имеют и линии напряженности (рис. 4.7), которые направлены от заряда, если он положителен (рис. 4.7, а), и к заряду, если он отрицателен (рис. 4.7, б). На рисунке 4.8, а представлены линии напряженности электростатического поля, создаваемого двумя точечными, одинаковыми по модулю, но противоположными по знаку зарядами, а на рисунке 4.8, б – линии напряженности поля двух положительных и одинаковых по модулю зарядов.

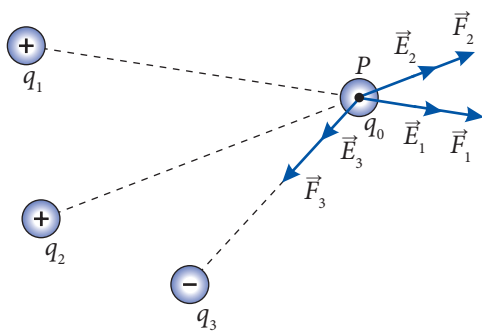


Рис. 4.5

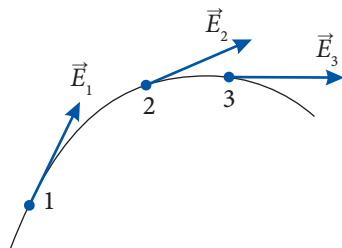


Рис. 4.6

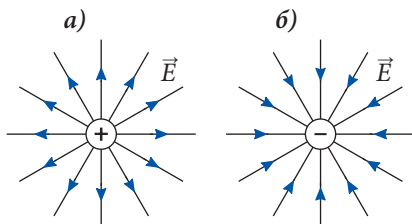


Рис. 4.7



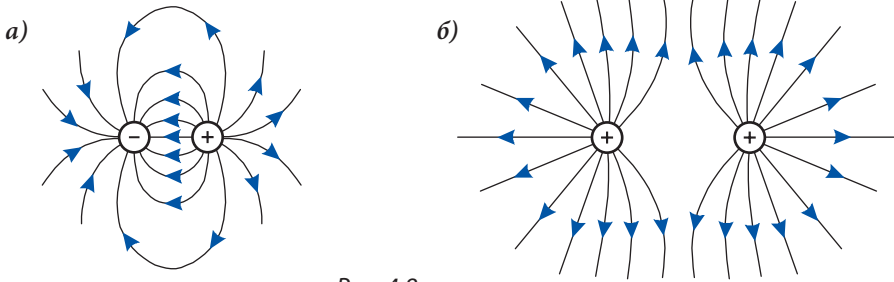


Рис. 4.8

Из рисунков 4.7 и 4.8 видно, что густота линий напряженности больше вблизи зарядов, т.е. в областях, где напряженность электрического поля больше. Эта связь между величиной напряженности электрического поля и густотой линий напряженности одинакова для любых электростатических полей.

**Электрическое поле, вектор напряженности которого  $\vec{E}$  – величина постоянная, называется однородным полем.**

Линии напряженности однородного поля представляют собой параллельные и эквидистантные отрезки прямых. Однородным является электрическое поле между двумя параллельными, достаточно большими пластинами, заряженными одинаковыми по величине, но противоположными по знаку зарядами. Однако, как видно из рисунка 4.9, у краев пластин поле уже не однородно.

Линии напряженности начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных. В случае изолированного положительного заряда они начинаются на заряде и уходят в бесконечность. Если заряд отрицателен, то линии напряженности начинаются в бесконечности и заканчиваются на заряде.

Ниже приведены сведения, отражающие аналогию гравитационного и электростатического полей.

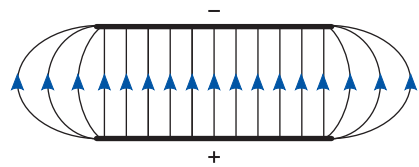


Рис. 4.9

### ПОЛЕ

гравитационное  $\longleftrightarrow$  электростатическое

### ХАРАКТЕР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Притяжение во всех случаях  $\longleftrightarrow$  Притяжение или отталкивание в зависимости от знаков электрических зарядов

### СИЛА

Закон всемирного тяготения  $\longleftrightarrow$  Закон Кулона

$$F = K \frac{m_1 m_2}{r^2}; \quad \longleftrightarrow \quad F = k_e \frac{|q_1| |q_2|}{r^2};$$

Постоянная тяготения  $\longleftrightarrow$  Постоянная  $k_e = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ ;

$$K = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \quad \longleftrightarrow \quad \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_e} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$$

## НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ

$$\vec{\Gamma} = \frac{\vec{F}}{m_0} \quad \leftarrow \text{определения} \rightarrow \quad \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

$$|\Gamma| = \frac{\text{Н}}{\text{кг}} = \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \quad \leftarrow \text{единицы} \rightarrow \quad [E] = \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$$

$$\Gamma = K \frac{m}{r^2} \quad \leftarrow \text{для точечных тел} \rightarrow \quad E = k_e \frac{|q|}{r^2}$$

### Пример решения задачи

**1**

**Дано:**

$$q_1 = -q,$$

$$q_2 = -4,5 q,$$

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,$$

$$l = 10 \text{ см}$$

$$x - ?$$

СИ:

$$0,1 \text{ м}$$

м

Два маленьких шарика заряжены одноименными электрическими зарядами  $q_1 = -q$  и  $q_2 = -4,5 q$ . Определите положение точек, в которых напряженность поля, создаваемого зарядом  $q_1$ , в 2 раза больше, чем создаваемого зарядом  $q_2$ . Расстояние между зарядами  $l = 10$  см.

### Решение

Поскольку напряженность электрического поля – величина векторная, то существуют 2 точки,  $A$  и  $B$  (см. рис. 4.10), удовлетворяющие условию задачи  $E_1 = 2E_2$ : когда  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  направлены противоположно (точка  $A$ ) и когда направлены одинаково (точка  $B$ ). Обозначим через  $x$  расстояние от заряда  $q_1$  до точки  $A$  ( $x = x_1$ ) или до точки  $B$  ( $x = x_2$ ). Используя выражение (4.11) и условие задачи, приходим к равенству:

$$k_e \frac{|q_1|}{x^2} = 2k_e \frac{|q_2|}{(l-x)^2}$$

или

$$\frac{1}{x^2} = \frac{9}{(l-x)^2}.$$

Из этого равенства получаем квадратное уравнение:

$$8x^2 + 2lx - l^2 = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$x_{1,2} = \frac{-2l \pm \sqrt{4l^2 + 32l^2}}{16} = \frac{-l \pm 3l}{8}$$

или

$$x_1 = \frac{l}{4} = 2,5 \text{ см}; \quad x_2 = -\frac{l}{2} = -5 \text{ см}.$$

Итак, напряженность электрического поля, создаваемого зарядом  $q_1$ , в 2 раза больше поля, создаваемого зарядом  $q_2$ , в точках:  $A$ , расположенной между зарядами на расстоянии

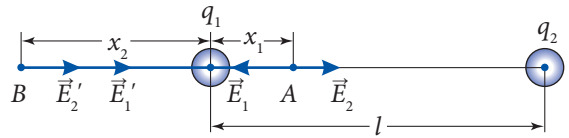


Рис. 4.10

$x_1 = 2,5$  см от заряда  $q_1$  и  $l - x_1 = 7,5$  см от заряда  $q_2$ ;  $B$ , расположенной слева от заряда  $q_1$ , на расстоянии  $|x_2| = 5$  см от него, и  $l + |x_2| = 15$  см от заряда  $q_2$ .

### Пример решения задачи

2

#### Дано:

$q_1 = 3 \cdot 10^{-9}$  Кл,  
 $q_2 = 5 \cdot 10^{-9}$  Кл,  
 $q_3 = -1 \cdot 10^{-9}$  Кл,  
 $q_4 = 2 \cdot 10^{-9}$  Кл,  
 $a = 0,06$  м,  
 $k_e = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>  
 $E - ?$

В вершинах квадрата со стороной 6 см находятся четыре точечных заряда, равные соответственно 3 нКл, 5 нКл, -1 нКл и 2 нКл. Определите напряженность электрического поля в центре квадрата.

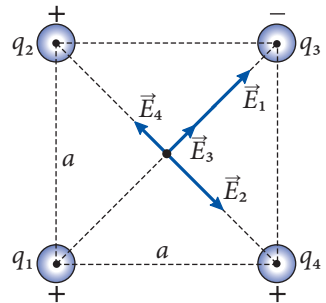


Рис. 4.11

#### Решение

На рисунке 4.11 показана система зарядов и векторы напряженности электрических полей, создаваемых этими зарядами. Векторы начинаются в центре квадрата, а направления определяются знаками соответствующих зарядов. Напряженность результирующего поля в центре квадрата согласно принципу суперпозиции равна  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$ .

Сложим каждые два вектора, направленные вдоль одной диагонали. Модуль вектора  $(\vec{E}_1 + \vec{E}_3)$  равен  $(E_1 + E_3)$ , а вектора  $(\vec{E}_2 + \vec{E}_4)$  равен  $|E_2 - E_4|$ . Векторы  $(\vec{E}_1 + \vec{E}_3)$  и  $(\vec{E}_2 + \vec{E}_4)$  взаимно перпендикулярны. Следовательно, модуль результирующего вектора равен  $E = \sqrt{(E_1 + E_3)^2 + (E_2 - E_4)^2}$ . Расстояния между зарядами и центром квадрата равны половине длины диагонали квадрата, т.е.  $a\sqrt{2}/2$ . Модули напряженности полей, создаваемых каждым из зарядов, равны:

$$E_1 = k_e \frac{2q_1}{a^2}, \quad E_2 = k_e \frac{2q_2}{a^2}, \quad E_3 = k_e \frac{2q_3}{a^2} \quad \text{и} \quad E_4 = k_e \frac{2q_4}{a^2}.$$

Подставив эти значения в выражение для результирующей напряженности, получим:

$$E = \frac{2k_e}{a^2} \sqrt{(q_1 + q_3)^2 + (q_2 - q_4)^2}; \quad E = 25 \text{ кН/Кл.}$$

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Зависит ли напряженность электрического поля в данной точке от присутствия в нем пробного заряда?
2. Зависит ли направление вектора напряженности  $\vec{E}$  от знака электрического заряда, создающего поле? А от знака пробного заряда?
3. Согласно определению напряженность электрического поля  $\vec{E} = \vec{F}/q_0$ . Можно ли утверждать, что напряженность электрического поля прямо пропорциональна силе, действующей на пробный заряд, и обратно пропорциональна его величине? Аргументируйте ответ.
4. Сила, действующая на точечный заряд  $1,5 \cdot 10^{-6}$  Кл со стороны электрического поля, равна  $6 \cdot 10^{-3}$  Н. Какая сила будет действовать на точечный заряд  $3,5 \cdot 10^{-6}$  Кл, помещенный в эту же точку поля?

5. Напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии 15 см от точечного заряда, равна 400 Н/Кл. Чему равна напряженность электрического поля в точке, расположенной на расстоянии 12 см от заряда?
6. В двух вершинах равностороннего треугольника со стороной 6 см находятся заряды, равные +20 нКл и -20 нКл. Вычислите напряженность электрического поля в третьей вершине треугольника.
7. Два маленьких шарика, заряженных положительными зарядами  $q_1 = +q$  и  $q_2 = +4q$ , находятся на расстоянии  $l = 15$  см друг от друга. В какой точке напряженность электрического поля равна нулю?

## 4.3 РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ТОЧЕЧНОГО ЗАРЯДА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

### а. Электростатическое поле – поле потенциальное

Рассмотрим точечный заряд  $q_0$ , находящийся в электростатическом поле напряженностью  $\vec{E}$ . На заряд действует электрическая сила  $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ . При перемещении заряда эта сила, а точнее поле, совершает механическую работу. Проанализируем факторы, от которых зависит величина совершенной работы.

В механике было установлено, что в общем случае механическая работа является функцией процесса, т.е. зависит как от начального и конечного положений движущегося тела, так и от формы траектории его движения между этими положениями. При вычислении работы постоянной силы тяжести было установлено, что ее величина не зависит от формы траектории тела, а только от начального и конечного положений. Соответственно, работа силы тяжести по замкнутой траектории равна нулю. Силы, обладающие таким свойством, были названы **консервативными**, а их поля – **потенциальными полями**.

Рассмотрим пробный заряд  $q_0$ , движущийся в однородном электрическом поле ( $\vec{E} = \text{const}$ ). Ситуация подобна движению материальной точки массой  $m$  в однородном гравитационном поле ( $\vec{g} = \text{const}$ ). В обоих случаях силы, действующие на тела, постоянны: сила тяготения  $\vec{F}_{\text{тяг.}} = m\vec{g}$  и электрическая  $\vec{F}_{\text{эл.}} = q_0 \vec{E}$ .

Можно предположить, что работа, совершаемая однородным полем, **не зависит** от формы траектории, по которой движется пробный заряд, а зависит только от его начального и конечного положений.

Чтобы подтвердить это предположение, вычислим работу поля, совершаемую при перемещении заряда  $q_0$  из произвольного положения 1 в положение 2 разными путями (рис. 4.12).

Рассмотрим траекторию 1a2, на которой отрезок 1a параллелен вектору  $\vec{E}$ , а отрезок a2 перпендикулярен вектору  $\vec{E}$ . Работа на последнем отрезке равна нулю.  $A_{1a2} = A_{1a} = Fd = q_0 Ed$ , где  $d$  – длина отрезка 1a.

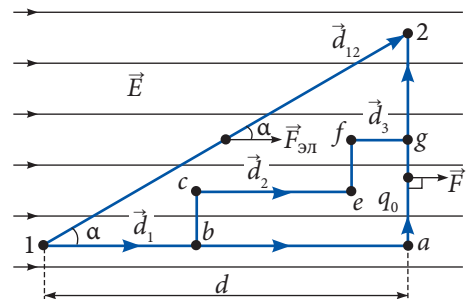


Рис. 4.12

Проанализируем более сложную траекторию  $1bcefg2$ , образованную отрезками  $1b$ ,  $ce$  и  $fg$ , с длинами, равными  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$  и параллельными вектору  $\vec{E}$ , а также отрезками  $bc$ ,  $ef$ ,  $g2$ , перпендикулярными этому вектору. На последних отрезках работа поля равна нулю, следовательно  $A_{1bcefg2} = A_{1b} + A_{ce} + A_{fg} = Fd_1 + Fd_2 + Fd_3 = q_0E(d_1 + d_2 + d_3)$ . Но  $d_1 + d_2 + d_3 = d$ , значит  $A_{1bcefg2} = q_0Ed$ . Мы получили ту же величину:  $A_{1bcefg2} = A_{1a2}$ .

Очевидно, любую другую траекторию, соединяющую точки 1 и 2, можно приближенно представить как ломаную линию, подобную рассмотренной выше, тогда в результате вычислений будет получено то же значение работы, совершенной полем.

Следовательно, работа однородного электрического поля напряженностью  $\vec{E}$ , совершаемая при перемещении точечного заряда  $q_0$  из точки 1 в 2, равна:

$$A_{12} = q_0Ed_{12}\cos\alpha = q_0Ed, \tag{4.13}$$

где  $d$  – это проекция вектора перемещения  $\vec{d}_{12}$  на направление напряженности  $\vec{E}$ .

Величина работы электрического поля не зависит от формы траектории, по которой движется точечный заряд, т.е. **однородное электростатическое поле является потенциальным**.

Рассмотрим электростатическое поле, создаваемое точечным зарядом  $q$ . Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении пробного заряда  $q_0$  из произвольного положения 1 в конечное 2 (рис. 4.13).

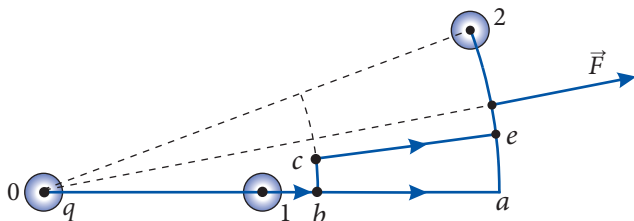


Рис. 4.13

Допустим, что сначала заряд  $q_0$  перемещается вдоль радиального участка  $1a$ , а затем вдоль дуги окружности  $a2$ . Работа  $A_{1a2} = A_{1a} + A_{a2}$ . На участке дуги электрическая сила  $\vec{F} = q_0\vec{E}$  направлена по радиусу, а значит, все время перпендикулярна элементарному перемещению, т.е. работа равна нулю:  $A_{a2} = 0$ . Получаем  $A_{1a2} = A_{1a}$ .

Вычислим работу, совершаемую полем при перемещении заряда  $q_0$  по траектории  $1bce2$ , образованной двумя радиальными отрезками ( $1b$  и  $ce$ ) и двумя отрезками дуги окружности ( $bc$  и  $e2$ ). Работа на отрезках дуги равна нулю, следовательно,  $A_{1bce2} = A_{1b} + A_{ce}$ . Из рисунка видно, что радиальные отрезки  $ba$  и  $ce$  имеют равную длину, а концы  $b$  и  $c$  находятся на одинаковых расстояниях от заряда  $q_0$ . Отсюда следует, что величины электрических сил в соответствующих точках этих отрезков одинаковы, поэтому равны и работы, совершаемые электрическим полем:  $A_{ba} = A_{ce}$ . Получаем  $A_{1bce2} = A_{1b} + A_{ba} = A_{1a}$ , значение, равное работе, совершенной на траектории  $1a2$ .

Произвольную траекторию между точками 1 и 2 можно приближенно представить состоящей из большого числа последовательных радиальных отрезков и отрезков дуг окружности. Путем рассуждений, подобных изложенным выше, приходим к выводу, что работа электрического поля точечного заряда зависит только от начального и конечного положений пробного заряда, а не от формы траектории между этими положениями.

Исходя из принципа суперпозиции электрических полей, можно считать, что любое электростатическое поле создается определенной системой точечных зарядов. Обобщая полученные выше результаты, заключаем:

Работа, совершаемая произвольным электростатическим полем при перемещении в нем точечного (пробного) заряда, не зависит от формы траектории движения заряда, а зависит только от его начального и конечного положений. Таким образом, электростатическое поле является **потенциальным**, а сила, действующая на точечные заряды со стороны поля, – **консервативной**.

## 6. Работа электрического поля. Электрический потенциал

Из курса механики мы знаем, что механическая работа консервативных сил выражается через потенциальную энергию

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2}, \quad (4.14)$$

что применимо и в электростатике. Через  $W_n$  обозначена потенциальная энергия точечного заряда  $q_0$  в соответствующей точке электростатического поля.

Сила, действующая на точечный заряд со стороны электростатического поля ( $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ ), прямо пропорциональна величине заряда. Следовательно, работа, совершаемая полем при перемещении заряда, также пропорциональна заряду. Из выражения (4.14) следует, что и потенциальная энергия  $W_n$  заряда  $q_0$ , находящегося в произвольной точке электростатического поля, прямо пропорциональна величине заряда ( $W_n \sim q_0$ ).

Приходим к выводу, что отношение потенциальной энергии к заряду  $W_n/q_0$  не зависит от величины заряда и является функцией точки электростатического поля, в которой находится заряд. Таким образом, это отношение является скалярной характеристикой поля в данной точке. Она называется **электрическим потенциалом** и обозначается  $\varphi$ .

Потенциалом электростатического поля в данной точке называется скалярная физическая величина, равная отношению потенциальной энергии точечного заряда, помещенного в эту точку поля, к величине заряда:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0}. \quad (4.15)$$

Единица потенциала называется **вольт** (обозначается В). Из (4.15) получаем:

$$[\varphi] = \frac{[W_n]}{[q_0]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}.$$

Зная электрический потенциал в данной точке поля, можно определить потенциальную энергию точечного заряда, помещенного в эту точку поля:

$$W_n = q_0 \varphi. \quad (4.16)$$

Потенциал – это **энергетическая характеристика** электрического поля. Напомним, что напряженность электрического поля (векторная величина) является **силовой характеристикой**.

Подставив соотношение (4.16) в формулу (4.14), получим выражение для работы, совершаемой электростатическим полем:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (4.17)$$

Величина  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  называется **разностью потенциалов**. Как и потенциал, она выражается в вольтах:

Соотношение (4.17) позволяет определить единицу **вольт**.

**Вольт** – это разность потенциалов двух точек электрического поля, при перемещении между которыми точечного заряда в 1 Кл совершается механическая работа в 1 Дж.

Разность потенциалов двух точек электростатического поля называется также **электрическим напряжением** и обозначается  $U$ . Таким образом, электрическое напряжение

$$U = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (4.18)$$

а механическая работа

$$A_{12} = q_0 U. \quad (4.19)$$

Выражение (4.18) или (4.19) позволяет ввести новую единицу работы и энергии, которая широко используется в электронике, атомной и ядерной физике. Эта единица называется **электронвольт** (обозначается эВ). Электрический заряд электрона равен  $e = -1,60 \cdot 10^{-19}$  Кл. Допустим, что электрон перемещается между двумя точками, разность потенциалов которых равна  $(-1)$  В. В этом случае поле совершает работу, равную  $(-1,60) \cdot 10^{-19}$  Кл  $\cdot$   $(-1)$  В =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж. На эту величину возрастет энергия электрона.

Один электронвольт равен изменению энергии электрона при его перемещении между двумя точками электрического поля, разность потенциалов которых равна 1 вольту:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Из формулы (4.17) видно, что совершенная работа определяет разность потенциалов:

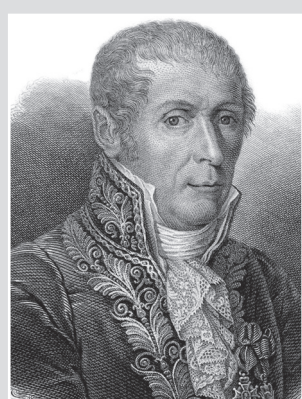
$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q_0}. \quad (4.20)$$

Разность потенциалов двух точек электростатического поля равна отношению работы, совершаемой полем при перемещении точечного заряда между этими точками, к величине этого заряда.

Соотношение (4.20) определяет разность потенциалов, а не величины потенциалов в соответствующих точках. Разность потенциалов не изменится, если мы к каждому потенциалу прибавим одну и ту же произвольную постоянную величину. Считая потенциал  $\varphi' = \varphi + \text{const}$ , для разности потенциалов получим:

$$\varphi'_1 - \varphi'_2 = (\varphi_1 + \text{const}) - (\varphi_2 + \text{const}) = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Произвольная константа выбирается из соображений удобства. Обычно считают, что потенциал равен нулю на достаточно больших расстояниях от электрического заряда, создающего поле. В некоторых задачах потенциал Земли считается равным нулю. Точка, потенциал которой считается равным нулю, называется **точкой от-**



Основная деятельность Вольта относится к области электрических явлений. Усовершенствовал электрофор (1775) – электростатическое устройство, состоящее из двух дисков: диэлектрического и металлического. Первый диск электризуется трением, а второй – через влияние при его приближении к диэлектрическому диску. Сконструировал чувствительный электроскоп с соломенными нитями (1781), электрометр с конденсатором (1787), позволяющий исследовать слабые источники электричества.

Продолжив опыты Гальвани, связанные с «животным электричеством» (сокращением мышечной ткани под действием электрического разряда), открыл взаимную электризацию металлов различной природы при их непосредственном контакте. Это позволило ему изобрести первый источник постоянного тока – гальванический элемент (1799), представляющий собой 20 пар

медных и цинковых дисков, разделенных суконными кружочками, пропитанными соленой водой. Вольта изучал тепловое расширение воздуха, открыл метан (1776) и сконструировал первую газовую лампу.

В настоящее время известны: электрофор Вольта, контактная разность потенциалов Вольта, элемент Вольта, вольтметр и единица электрического напряжения – вольт.

**счета.** Из выражения (4.16) следует, что и потенциальная энергия пробного заряда, находящегося в точке отсчета, равна нулю.

Обозначим через  $A_{10}$  работу, совершаемую электрическим полем при перемещении заряда  $q_0$  из точки 1 в точку отсчета ( $\varphi_0 = 0$ ). Тогда из (4.20) для потенциала получим:

$$\varphi_1 = \frac{A_{10}}{q_0}. \quad (4.21)$$

**Потенциал в данной точке поля равен отношению работы, совершаемой электрическим полем при перемещении точечного заряда из данной точки в точку отсчета, к величине перемещаемого заряда.**

Установим связь между напряженностью электрического поля и разностью потенциалов. Для этого рассмотрим однородное поле и две точки 1 и 2, расположенные на одной линии напряженности (рис. 4.14) на расстоянии  $d$  друг от друга. Обозначим через  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  электрические потенциалы этих точек. Работа, совершаемая при перемещении заряда  $q_0$  между ними, равна

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Работа может быть выражена через напряженность электрического поля  $\vec{E}$  (см. формулу 4.13):

$$A_{12} = Fd = q_0Ed.$$

Из двух последних выражений получаем:

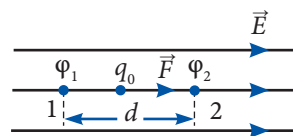


Рис. 4.14



$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed \quad (4.22)$$

и

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}. \quad (4.23)$$

Эти соотношения позволяют вычислять разность потенциалов, если известна напряженность однородного электрического поля или напряженность поля, если известен потенциал различных его точек.

Из выражения (4.23) установим единицу напряженности электрического поля:

$$[E] = \frac{[\varphi_1 - \varphi_2]}{[d]} = \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

Следует отметить, что свободный точечный заряд в электростатическом поле будет двигаться в направлении ускорения, сообщаемого ему электрической силой, т.е. в направлении этой силы. Если заряд положителен, то направление силы совпадает с направлением вектора напряженности  $\vec{E}$ . Следовательно, **свободный положительный заряд в электростатическом поле перемещается в направлении напряженности поля  $\vec{E}$** , т.е. как это видно из формулы (4.23) и рисунка 4.13, **в направлении уменьшения электрического потенциала. Свободный отрицательный заряд в электростатическом поле перемещается в направлении, противоположном вектору  $\vec{E}$** , т.е. **в направлении возрастания электрического потенциала.**

Рассмотрим точечный заряд  $q$ , в электростатическом поле которого движется пробный заряд  $q_0$ .

Кулоновская сила, обратно пропорциональная квадрату расстояния между точечными зарядами, является величиной переменной. Работа, совершаемая ею, не может быть вычислена с помощью методов элементарной математики, поэтому запишем без вывода выражение для потенциала  $\varphi$  точечного электрического заряда:

$$\varphi = k_e \frac{q}{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (4.24)$$

**Потенциал электростатического поля, создаваемого точечным зарядом, прямо пропорционален его величине и обратно пропорционален расстоянию от заряда.**

Потенциал электростатического поля, создаваемого системой точечных зарядов в некоторой точке, равен сумме потенциалов полей, создаваемых каждым из зарядов в отдельности:  $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots$ . Принцип суперпозиции электрических полей справедлив для обеих характеристик: напряженности  $\vec{E}$  и потенциала  $\varphi$ .

### **в.\* Эквипотенциальные поверхности**

Как было показано (п. 4.2), графически электростатическое поле может быть представлено с помощью линий напряженности, причем в любой точке этих воображаемых линий вектор напряженности поля  $\vec{E}$  касателен к соответствующей линии.

Введение второй характеристики поля – электрического потенциала  $\varphi$  – позволяет графически представить электростатическое поле с помощью так называемых **эквипотенциальных поверхностей**.

**Эквипотенциальной** называется поверхность, в каждой точке которой потенциал имеет одно и то же значение:  $\varphi = \text{const}$ .

Из определения следует, что разность потенциалов любых двух точек эквипотенциальной поверхности равна нулю. Поэтому согласно формуле (4.17) при перемещении точечного заряда по эквипотенциальной поверхности работа электрических сил равна нулю. Следовательно, электрические силы так же, как и линии напряженности электростатического поля, перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям в точках пересечения с ними.

Рассмотрим некоторые конкретные поля.

Линии напряженности однородных электростатических полей являются эквидистантными параллельными прямыми линиями. Эквипотенциальные поверхности – это параллельные плоскости, перпендикулярные линиям напряженности (рис. 4.15). На рисунке линии напряженности показаны сплошными линиями со стрелками, указывающими направление вектора  $\vec{E}$ , а эквипотенциальные поверхности – прерывистыми. Напомним, что потенциал уменьшается в направлении, указанном вектором напряженности.

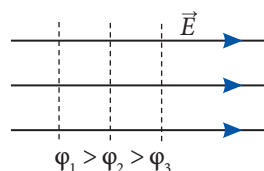


Рис. 4.15

Как видно из формулы (4.24), потенциал электростатического поля точечного заряда имеет одно и то же значение для всех точек, находящихся на равных расстояниях  $r$  от точечного заряда. Следовательно, эквипотенциальные поверхности поля точечного заряда – это сферические поверхности с зарядом в их общем центре (рис. 4.16). Из рисунка видно, что в точках пересечения линии напряженности, будучи радиальными, перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

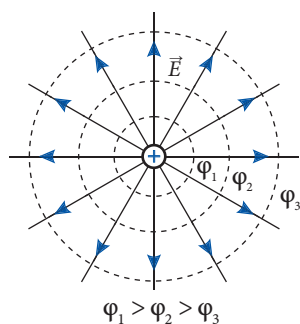


Рис. 4.16

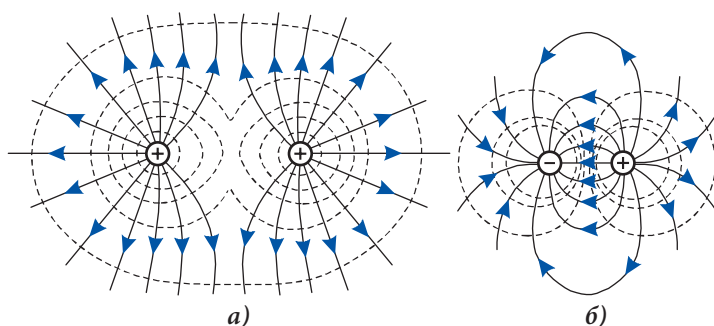


Рис. 4.17

На рисунке 4.17 представлены эквипотенциальные поверхности (прерывистыми линиями) и линии напряженности (сплошными линиями) электрического поля, созданного двумя металлическими шариками, заряженными одинаковыми по величине положительными зарядами (рис. 4.17, а), и равными по величине, но противоположными по знаку зарядами (рис. 4.17, б).

## Пример решения задачи

1

### Дано:

$c = 10$  см,  
 $q_1 = q = 8$  мкКл,  
 $q_2 = 4q_1$ ,  
 $q_0 = 1$  мкКл

### СИ:

0,1 м,  
 $8 \cdot 10^{-6}$  Кл,  
 $10^{-6}$  Кл

$A = ?$

Дж

На концах гипотенузы  $c = 10$  см прямоугольного треугольника с углом  $\alpha = 30^\circ$  расположены точечные заряды  $q_1 = q = 8$  мкКл и  $q_2 = 4q_1$ . Вычислите работу, необходимую для перемещения пробного заряда  $q_0 = 1$  мкКл из точки  $C$  в  $D$  (рис. 4.18) вдоль высоты, опущенной из вершины прямого угла.

## Решение

В соответствии с формулой (4.17),

$$A = q_0(\varphi_D - \varphi_C)$$

и задача сводится к определению потенциалов  $\varphi_C$  и  $\varphi_D$ , вычисляемых по формуле (4.24). Поскольку в каждой из точек  $C$  и  $D$  потенциал создается обоими зарядами,  $q_1$  и  $q_2$ , то  $\varphi_C$  и  $\varphi_D$  равны:

$$\varphi_C = \frac{k_e q_1}{CB} + \frac{k_e q_2}{CA}; \quad \varphi_D = \frac{k_e q_1}{BD} + \frac{k_e q_2}{AD}.$$

Из рисунка 4.18  $CB = AB \sin 30^\circ = c/2$ ;  $CA = AB \cos 30^\circ = \sqrt{3} c/2$ ;  $BD = CB \sin 30^\circ = c/4$ ;  $AD = AC \cos 30^\circ = 3 c/4$ ,  $q_2 = 4q_1$ . Следовательно:

$$\varphi_C = \frac{2k_e q}{c} + \frac{8k_e q}{\sqrt{3}c} = \frac{2k_e q}{\sqrt{3}c}(\sqrt{3} + 4),$$

$$\varphi_D = \frac{4k_e q}{c} + \frac{16k_e q}{3c} = \frac{28k_e q}{3c}$$

и для необходимой работы получаем:

$$A = q_0 \left[ \frac{28k_e q}{3c} - \frac{2k_e q}{\sqrt{3}c}(\sqrt{3} + 4) \right] = \frac{2k_e q_0 q}{3c} (11 - 4\sqrt{3}); \quad A \approx 2 \text{ Дж.}$$

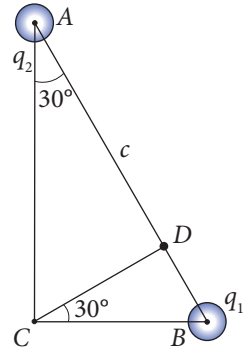


Рис. 4.18

## Пример решения задачи

2

### Дано:

$m = 10^{-10}$  кг,  
 $q = 10^{-6}$  Кл,  
 $v_0 = 500$  м/с,  
 $U = 1\,000$  В

$v = ?$

Пылинка массой  $10^{-10}$  кг и зарядом  $q = 10^{-6}$  Кл со скоростью 500 м/с попадает в однородное электрическое поле и проходит ускоряющую разность потенциалов 1 000 В. Чему равна скорость пылинки после ускорения?

## Решение

Согласно теореме об изменении кинетической энергии  $A = E_{к2} - E_{к1}$ , где  $E_{к1}$  и  $E_{к2}$  – кинетические энергии пылинки на входе и выходе из электрического поля, соответственно,  $A$  – работа, совершаемая при перемещении пылинки.

$$E_{к1} = \frac{mv_0^2}{2}; E_{к2} = \frac{mv^2}{2}; A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU,$$

получаем:

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = qU,$$

откуда

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2q}{m}U}; v = 4\,500 \text{ м/с}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Как выражается через электрический потенциал потенциальная энергия точечного заряда, находящегося в электростатическом поле?
2. Потенциал электростатического поля в некоторой точке равен нулю. Равна ли нулю и напряженность электрического поля? Аргументируйте ответ, приведя примеры.
3. Каков физический смысл разности потенциалов (электрического напряжения)?
4. Электрический потенциал в некоторой области пространства остается неизменным. Что можно утверждать относительно напряженности электрического поля в этой области?
5. Потенциальная энергия пробного заряда  $q_0$ , расположенного в некоторой точке электростатического поля, равна 2,5 мДж. Какой потенциальной энергией обладает точечный заряд, равный  $1,8 q_0$ , внесенный в эту точку поля?
6. Работа электростатического поля при перемещении точечного заряда 3,6 мКл из точки А в точку В равна 0,9 мДж. Определите электрический потенциал в точке А, если потенциал в точке В равен 180 В.
7. Напряженность электрического поля между двумя параллельными металлическими пластинами равна 500 В/м, а расстояние между ними – 10 см. Какую скорость приобретет электрон, вылетевший из отрицательной пластины с пренебрежимо малой скоростью, при достижении им положительной пластины?
8. В вершинах квадрата со стороной 15 см закреплены точечные заряды  $q, 2q, 3q$  и  $4q$ , где  $q = 5$  нКл. Найдите потенциал результирующего электрического поля в центре квадрата.
9. Потенциал электростатического поля точечного заряда на расстоянии 10 см от него равен 150 В. Чему равно значение потенциала на расстоянии 25 см от заряда?
10. Расстояние между двумя точечными зарядами противоположного знака равно 18 см. Определите отношение модулей этих зарядов, если известно, что в точке, расположенной на прямой, соединяющей заряды, на расстоянии 12 см от положительного заряда, потенциал результирующего электрического поля равен нулю.
11. Электрон проходит ускоряющую разность потенциалов 100 В. Чему равна скорость электрона после ускорения?
- 12.\* На *рисунке 4.19* прерывистыми линиями показаны несколько эквипотенциальных поверхностей, причем разность потенциалов между двумя соседними поверхностями одна и та же. Сравните значения напряженности электрического поля в точках А и В. Аргументируйте свой ответ.

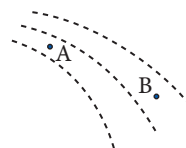


Рис. 4.19

**Проводниками** называются вещества, содержащие свободные электрические заряды, т.е. заряженные частицы, которые могут свободно перемещаться по телу. В металле это валентные электроны, которые в процессе образования тела из атомов покидают их и становятся общими для всего тела. Таким образом, металл состоит из положительных ионов, расположенных в узлах кристаллической решетки, и свободных электронов. В отсутствие внешних электрических полей свободные электроны перемещаются хаотически, подобно молекулам газа. Поэтому совокупность свободных электронов в металле называют **электронным газом**.

Специфическое поведение проводников при помещении их в электростатическое поле обусловлено наличием в них свободных электронов.

Рассмотрим две параллельные металлических пластины, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга и заряженные разноименными, но одинаковыми по величине зарядами. Электрическое поле между ними однородно за исключением областей вблизи краев пластин. На рисунке 4.20, а изображены линии напряженности поля, прерывистой линией показана область поля, в которую вносят металлическое тело.

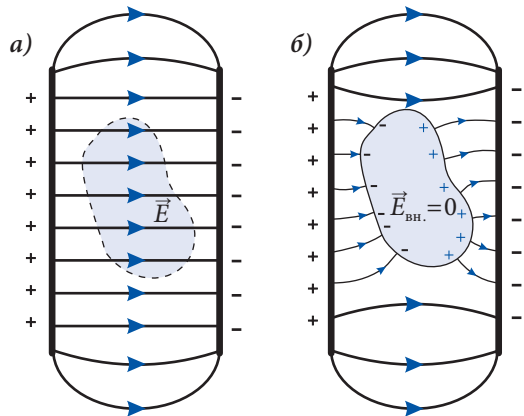


Рис. 4.20

При внесении проводящего тела в поле на его свободные электроны начинает действовать электрическая сила  $\vec{F} = -e\vec{E}$ , которая сообщает им ускорение, направленное противоположно вектору  $\vec{E}$ . Как следствие, поверхность проводника, расположенная со стороны положительной пластины, заряжается отрицательно. Одновременно на противоположной поверхности проводника остается избыточный положительный заряд (рис. 4.20, б). Заряды противоположного знака, появившиеся на поверхности проводника, создают электрическое поле, направление которого обратно внешнему полю. Таким образом, напряженность электрического поля  $\vec{E}$  внутри проводника становится меньше, чем снаружи. Этот процесс перемещения свободных зарядов продолжается до того момента, когда напряженность поля внутри проводника становится равной нулю:  $\vec{E}_{\text{вн.}} = 0$ . Далее прекращается любое направленное движение свободных зарядов проводника – он приходит в состояние **электрического равновесия**. В этом состоянии продолжается только хаотическое движение свободных электронов.

**Напряженность электрического поля внутри проводника, помещенного в электростатическое поле, равна нулю. При этом внутренняя часть проводника нейтральна.**

Электрическое равновесие устанавливается за достаточно малый промежуток времени благодаря малой массе электрона.

Рассмотрим электрическое поле во внешней области, в непосредственной близости от проводника. Если бы на поверхности проводника вектор напряженности  $\vec{E}$  имел касательную составляющую, то существовали бы касательные силы, перемещающие электроны вдоль поверхности. Но в состоянии электрического равновесия они не могут двигаться упорядоченно. Следовательно, линии напряженности вне проводника, в непосредственной близости от его поверхности, нормальны к соответствующей поверхности (рис. 4.20, б).

Как видно из рисунка, линии напряженности, которые начинаются на положительной пластине, заканчиваются на отрицательных зарядах проводника, внутри него отсутствуют, затем начинаются на положительных зарядах проводника и заканчиваются на отрицательной пластине.

Из соотношения (4.23) между напряженностью электрического поля  $E$  и разностью потенциалов  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ , а именно  $E = (\varphi_1 - \varphi_2)/d$ , и того факта, что внутри проводника  $E_{\text{вн.}} = 0$ , следует  $(\varphi_1 - \varphi_2) = 0$  для любых двух точек проводника.

**Электрический потенциал одинаков во всех точках проводника, находящегося в электростатическом поле.**

Проанализируем другой случай: заряженный проводник в отсутствие внешнего поля имеет избыток зарядов одного знака. Такие заряды отталкиваются. Они удаляются друг от друга на максимально возможное расстояние, т.е. распределяются по поверхности проводника, который внутри нейтрален. Напряженность электрического поля внутри проводника равна нулю, а вне, в непосредственной близости от его поверхности, линии напряженности нормальны к поверхности в соответствующих точках (рис. 4.21). В этих условиях электрический потенциал имеет одинаковое значение во всех точках проводника.

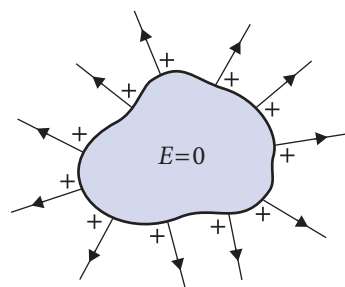


Рис. 4.21

Если убрать часть вещества из внутренней области заряженного проводника, то это не изменит электрического поля проводника, так что его электрическое поле определяется электрическим зарядом, формой и размерами проводника и не зависит от наличия внутренних полостей.

Электрическое поле вне заряженного металлического шара с полостями внутри или без них будет таким, как если бы весь электрический заряд был сконцентрирован в его центре.

Распределение электрических зарядов по внешней поверхности проводника может быть продемонстрировано с помощью следующего опыта (рис. 4.22).

На упругой металлической сетке, насаженной на изолирующие подставки, закрепляются легкие полоски бумаги. При электризации сетки таким же по

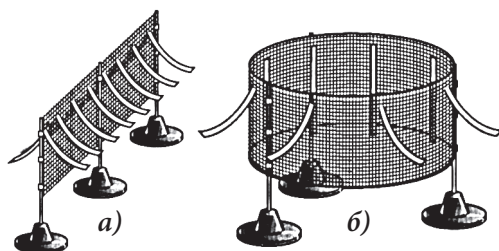


Рис. 4.22

знаку зарядом заряжаются и полоски и отталкиваются от сетки (рис. 4.22, а). Если сетка плоская, то полоски отталкиваются по обе стороны сетки, если сетку свернуть в цилиндр, то отталкивание бумажных полосок происходит только на внешней стороне сетки (рис. 4.22, б).

Свойство проводников не позволять электрическому полю проникать внутрь своей поверхности используется для защиты чувствительных приборов от действия внешних электрических полей. Такие приборы помещают внутрь металлической коробки (или сетки), называемой «клеткой Фарадея».

### Пример решения задачи

Электрический заряд металлической сферы радиуса  $R$  равен  $q$ . Изобразите графики зависимостей напряженности и потенциала электрического поля сферы от расстояния  $r$  от ее центра.

#### Решение

Напряженность электрического поля внутри сферы равна нулю, вне ее выражается формулой (4.11) для напряженности поля точечного заряда. Следовательно,

$$E = \begin{cases} 0, & \text{для } r < R; \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, & \text{для } r \geq R. \end{cases}$$

Потенциал электрического поля вне сферы вычисляется по формуле (4.24) для потенциала поля точечного заряда:

$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$  (для  $r \geq R$ ). На поверхности сферы потенциал равен  $\varphi_R = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}$ .

Таким же является и потенциал во всех точках внутри сферы. Таким образом, потенциал поля заряженной сферы равен:

$$\varphi = \begin{cases} \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}, & \text{для } r \leq R; \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}, & \text{для } r \geq R. \end{cases}$$

Соответствующие графики представлены на рисунке 4.23.

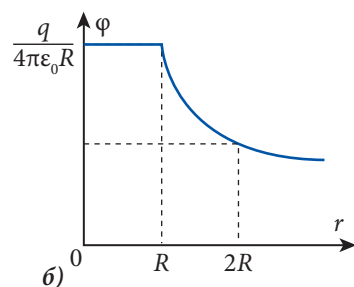
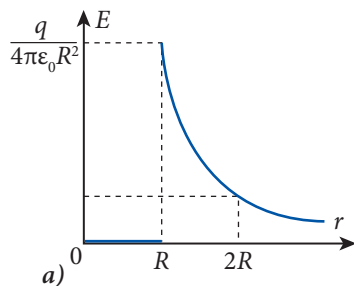


Рис. 4.23

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Все ли электроны проводников являются свободными?
2. Что собой представляет электронный газ в металлах?
3. Возможно ли движение каких-либо заряженных частиц внутри проводника, который находится в электрическом равновесии?
4. Два заряженных металлических проводника  $A$  и  $B$  имеют потенциалы  $\varphi_A > \varphi_B$ . Какой из проводников будет отдавать электроны, если проводники привести в контакт?

- Два одинаковых металлических шара радиусом  $R$  заряжены в одном случае разноименными зарядами  $+q$  и  $-q$ , а в другом – зарядами одного знака  $+q$  и  $+q$ . Сравните силы взаимодействия шаров в обоих случаях, если расстояние между их центрами равно: а)  $3R$ ; б)  $3000R$ .
- Могут ли притягиваться два металлических тела, заряженных одноименно? Аргументируйте ответ.

## 4.5

### ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

**Диэлектриками или изоляторами** называются вещества, которые в отличие от проводников не содержат свободных заряженных частиц; они состоят из нейтральных молекул.

Для изучения поведения диэлектриков во внешнем электрическом поле проанализируем электрические свойства нейтральных молекул, зависящие от распределения электрических зарядов в них. Эти заряды могут перемещаться только в пределах молекулы, поэтому называются **связанными зарядами**.

Рассмотрим конкретный пример молекулы воды ( $H_2O$ ), содержащей один атом кислорода и два атома водорода. Атом кислорода притягивает электроны водорода так, что область, где располагается кислород, заряжена отрицательно, а та, где находится водород, – положительно (рис. 4.24, а). У молекул такого рода можно указать электрические полюсы – положительный и отрицательный (рис. 4.24, б).

**Молекулы, в которых центр положительных зарядов смещен относительно центра отрицательных зарядов, называются полярными молекулами.**

Полярными являются также молекулы  $CO$  – окиси углерода (II),  $H_2S$  – сернистого водорода и т.д.

Обычно используется простая модель молекулы, в которой центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают. Такая модель называется **электрическим диполем**.

**Электрический диполь** – это система двух точечных зарядов, равных по величине, но противоположных по знаку, расположенных на определенном расстоянии друг от друга (рис. 4.24, в).

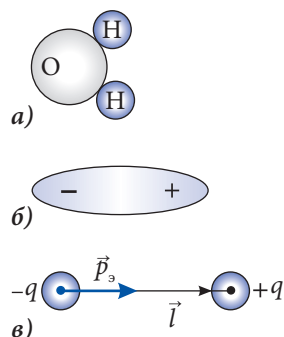


Рис. 4.24

Расстояние  $l$  между зарядами диполя называется **плечом диполя**, а произведение плеча и заряда – **дипольным моментом** или **электрическим моментом**:

$$p_s = ql. \quad (4.25)$$

Плечо диполя – величина векторная, направленная от отрицательного заряда к положительному, дипольный момент – тоже величина векторная и также направленная, поэтому можно записать (рис. 4.24, в):

$$\vec{p}_s = q\vec{l}. \quad (4.26)$$

Дипольный момент – это электрическая характеристика молекул, и у полярных молекул он отличен от нуля даже в отсутствие внешнего электрического поля.



Существуют молекулы, в которых электрические заряды распределены симметрично, так что центр положительных зарядов совпадает с центром отрицательных (рис. 4.24, а). Их дипольный момент равен нулю, они называются **неполярными молекулами**. Неполярными являются молекулы инертных газов, кислорода ( $O_2$ ), азота ( $N_2$ ) и т.д.

Проанализируем поведение молекул обоих типов в однородном электрическом поле напряженностью  $\vec{E}_0$ .

Вначале рассмотрим полярную молекулу (рис. 4.25). На положительный заряд действует электрическая сила  $\vec{F}_+ = q\vec{E}_0$ , совпадающая по направлению с вектором  $\vec{E}_0$ , а на отрицательный заряд – сила  $\vec{F}_- = -q\vec{E}_0$ , направленная противоположно. Силы  $\vec{F}_+$  и  $\vec{F}_-$  равны по модулю, их результирующая равна нулю, поэтому они не могут привести к поступательному движению молекулы. Эти силы стремятся повернуть ее так, чтобы дипольный момент установился по полю, т.е. оказывают ориентирующее действие.

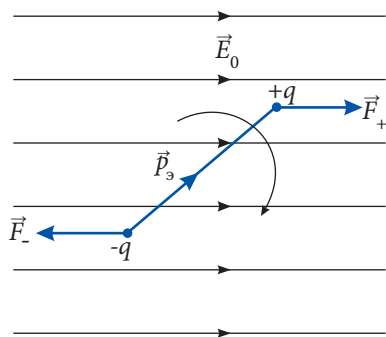


Рис. 4.25

Теперь рассмотрим неполярную молекулу в электрическом поле (рис. 4.26, а). Под действием электрических сил положительные и отрицательные заряды смещаются в противоположных направлениях, деформируя молекулу. Распределение зарядов в ней уже не является симметричным (рис. 4.26, б), молекула приобретает дипольный момент, ориентированный в направлении напряженности поля  $\vec{E}_0$ . При увеличении напряженности  $\vec{E}_0$  дипольный момент также увеличивается, он называется **наведенным дипольным моментом**.

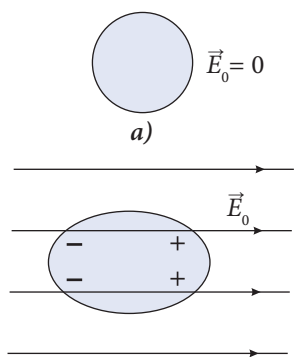


Рис. 4.26

Диэлектрики, состоящие из полярных молекул, называются **полярными диэлектриками**, соответственно, состоящие из неполярных молекул, – **неполярными диэлектриками**.

Опишем электрические свойства диэлектриков, зная уже поведение молекул в электрическом поле.

Рассмотрим однородное электрическое поле между двумя параллельными, большого размера пластинами, заряженными разноименно. Напряженность электрического поля между пластинами в вакууме равна  $\vec{E}_0$ .

Внесем в это электрическое поле полярный диэлектрик. До внесения в поле, благодаря тепловому движению, дипольные моменты были ориентированы хаотически. Электрическое поле ориентирует молекулы таким образом, чтобы дипольные моменты установились по полю. Эта ориентация является частичной из-за теплового движения, оказывающего обратное действие. Из рисунка 4.27, а видно, что внутри диэлектрик остается нейтральным, а на его поверхности находятся электрические заряды, знак которых противоположен знаку зарядов соседних пластин.

При внесении в пространство между заряженными пластинами неполярного диэлектрика его молекулы приобретают наведенные дипольные моменты. Внутри диэлектрик остается нейтральным, а на его поверхностях, как и в предыдущем случае, появляются связанные заряды (рис. 4.27, б).

Под действием внешнего электрического поля дипольные моменты молекул диэлектрика ориентируются и на его поверхностях появляются электрические связанные заряды. Это явление называется **поляризацией диэлектрика**.

На рисунке 4.28 показано, к чему привела поляризация диэлектрика. Из рисунка видно, что поверхностные связанные заряды создают внутреннее электрическое поле напряженностью  $\vec{E}_{\text{вн.}}$ , направленной противоположно напряженности внешнего поля  $\vec{E}_0$ . В соответствии с принципом суперпозиции поле внутри диэлектрика равно  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{вн.}}$ . Его значение  $E = E_0 - E_{\text{вн.}}$ . Следовательно, напряженность поля в диэлектрике меньше, чем в вакууме:  $E < E_0$ . Только часть линий напряженности поля, создаваемого зарядами на пластинах, проникает в диэлектрик, остальные заканчиваются на связанных зарядах его поверхности (рис. 4.28).

Безразмерная физическая величина  $\epsilon$ , показывающая, во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике меньше, чем в вакууме, называется **диэлектрической проницаемостью диэлектрика**.

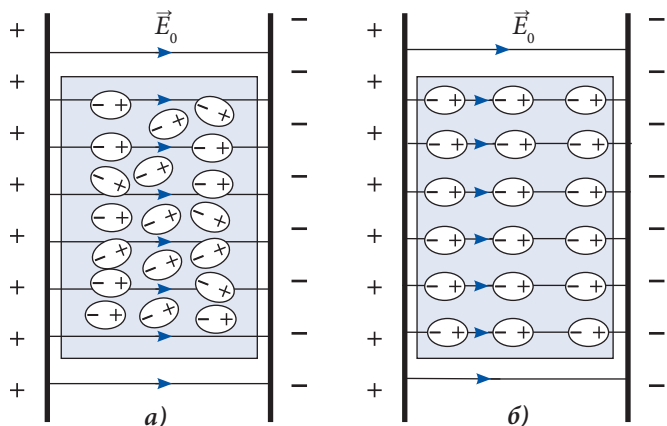


Рис. 4.27

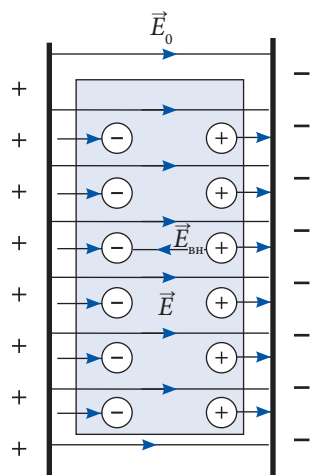


Рис. 4.28

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}. \quad (4.27)$$

Очевидно, для вакуума  $\epsilon = 1$ .

Из (4.27) следует, что напряженности электрического поля в диэлектрике и в вакууме связаны соотношением

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\epsilon}. \quad (4.28)$$

В нижеследующей таблице приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых диэлектриков. Видно, что диэлектрическая проницаемость воздуха слегка отлична от единицы. Соответственно, напряженность электрического поля в воздухе приблизительно равна напряженности в вакууме.

Вещество	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$ ,	Вещество	Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon$ ,
Вакуум	1,0000	Фарфор	4,44 – 6,8
Воздух	1,0006	Кварцевое стекло	5
Керосин	2,1	Обычное стекло	6,0 – 10,0
Парафин	2,2	Этиловый спирт	25,8
Трансформаторное масло	2,2	Глицерин	43
Янтарь	2,7	Вода	81

Рассмотрим точечный заряд  $q$ , находящийся в диэлектрической среде. Исходя из вышеизложенного и из формулы (4.11) для напряженности поля в вакууме, получим выражение для напряженности электрического поля, создаваемого точечным зарядом в диэлектрике:

$$E = k_e \frac{|q|}{\epsilon r^2} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}. \quad (4.29)$$

Согласно (4.22) и (4.28) разность потенциалов в диэлектрике также в  $\epsilon$  раз меньше, чем в вакууме:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\varphi_{1,0} - \varphi_{2,0}}{\epsilon}, \quad (4.30)$$

где  $(\varphi_{1,0} - \varphi_{2,0})$  – это разность потенциалов между теми же точками в вакууме.

Это утверждение относится и к значению электрического потенциала в диэлектрике.

Уменьшение в  $\epsilon$  раз напряженности электрического поля в диэлектрике приводит к уменьшению также в  $\epsilon$  раз и силы взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся в диэлектрике.

Выражение для закона Кулона принимает вид:

$$F = k_e \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2} = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}. \quad (4.31)$$

**Приложение.** Рассмотрим диполь в неоднородном электрическом поле, т.е. поле, напряженность которого  $\vec{E}$  изменяется в пространстве. На равные по модулю электрические заряды диполя со стороны поля действуют разные по модулю силы: в области поля с большей напряженностью сила больше. Следовательно, в неоднородном электрическом поле диполь не только ориентируется в направлении линий напряженности, но и втягивается в область поля с большей напряженностью. Подобным образом ведет себя диэлектрик, внесенный в неоднородное электрическое поле: он поляризуется и одновременно втягивается в область пространства, в которой напряженность поля больше.

На таком поведении диэлектрика в неоднородном электрическом поле основан принцип действия электростатического фильтра, схема которого представлена на рисунке 4.29. Он используется для удаления угольной пыли из газов, образующихся при сжигании угля. Электрическая часть состоит из двух электродов (1 и 2), между

которыми создается большая разность потенциалов (электрод 1 заряжен отрицательно, цилиндрический электрод 2 – положительно). Густота линий поля, а значит и напряженность электрического поля, больше возле отрицательного электрода (1).

Газы, содержащие угольную пыль, попадают в фильтр через отверстие (3). Пыль поляризуется и притягивается к отрицательному электроду (1). Здесь она захватывает электроны и отталкивается к положительному электроду (2), притягивается им и оседает. Таким образом, через отверстие (4) из фильтра выходит чистый воздух. По мере накопления угольной пыли на электроде, она под действием силы тяжести падает в сосуд (5), расположенный в нижней части фильтра, откуда периодически удаляется.

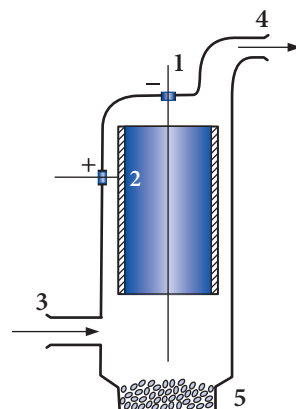


Рис. 4.29

### Пример решения задачи

**Дано:**

$$2\alpha_B = 90^\circ,$$

$$2\alpha_M = 76^\circ,$$

$$\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3,$$

$$\rho = 800 \text{ кг/м}^3$$

$\epsilon = ?$

Два одинаковых маленьких алюминиевых шарика подвешены на легких, изолирующих нитях равной длины в одной точке. При электризации в воздухе шарики расходятся на угол  $90^\circ$ . При погружении заряженных шариков в масло угол между нитями становится равным  $76^\circ$ . Определить диэлектрическую проницаемость масла. Плотность алюминия  $\rho_0 = 2700 \text{ кг/м}^3$ , масла –  $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$ .

### Решение

На рисунке 4.30, а представлена система заряженных шариков, находящихся в воздухе, и силы, действующие на один из шариков: сила тяжести  $\vec{G}$ , сила электрического отталкивания  $\vec{F}_{\text{эВ}}$  и сила натяжения нити  $\vec{T}_B$ . Шарик находится в равновесии и результирующая этих сил равна нулю:  $\vec{G} + \vec{F}_{\text{эВ}} + \vec{T}_B = 0$ . Следовательно,  $\vec{G} + \vec{F}_{\text{эВ}} = -\vec{T}_B$ , то есть диагональ параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{G}$  и  $\vec{F}_{\text{эВ}}$ , направлена вдоль нити подвеса и образует с вертикалью угол  $\alpha_B$ . Это позволяет нам выразить электрическую силу через силу тяжести:  $F_{\text{эВ}} = G \cdot \text{tg}\alpha_B$ . Обозначив через  $V$  объем шарика, получим для силы тяжести  $G = \rho_0 Vg$ , а для электрической силы  $F_{\text{эВ}} = \rho_0 Vg \cdot \text{tg}\alpha_B$ .

Рассмотрим случай, когда шарики находятся в масле (рис. 4.30, б). На каждый из шариков

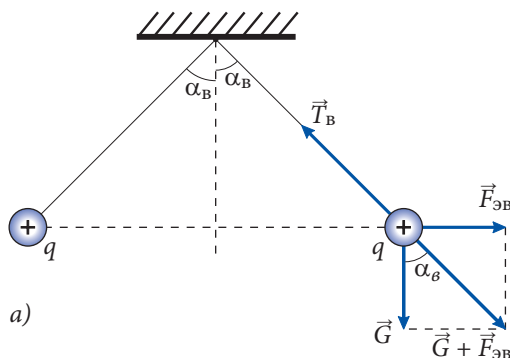


Рис. 4.30

ков действуют сила тяжести  $\vec{G}$ , сила Архимеда  $\vec{F}_A$ , направленная вертикально вверх, электрическая сила отталкивания  $\vec{F}_{ЭМ}$  и сила натяжения нити подвеса  $\vec{T}_M$ . Шарик находится в равновесии, сумма всех сил равна нулю:  $\vec{G} + \vec{F}_A + \vec{F}_{ЭМ} + \vec{T}_M = 0$ . Результирующая сил  $\vec{G}$  и  $\vec{F}_A$  направлена вертикально вниз и равна по модулю  $(G - F_A)$ . Следовательно, сумма сил  $(\vec{G} + \vec{F}_A)$  и  $\vec{F}_{ЭМ}$  направлена противоположно  $\vec{T}_M$ , образуя с вертикалью угол  $\alpha_M$ . Как видно из рисунка, электрическая сила  $F_{ЭМ} = (G - F_A) \operatorname{tg} \alpha_M$ . Подставив значение силы тяжести и силы Архимеда  $F_A = \rho V g$ , найдем  $F_{ЭМ} = (\rho_0 - \rho) V g \operatorname{tg} \alpha_M$ , а для отношения сил элект-

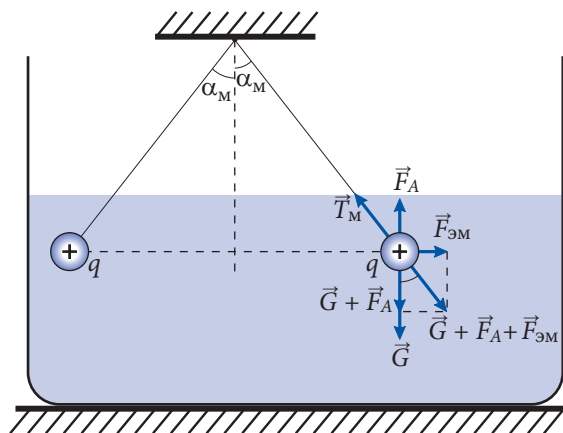


Рис. 4.30

рического взаимодействия получим  $\frac{F_{ЭВ}}{F_{ЭМ}} = \frac{\rho_0 \operatorname{tg} \alpha_B}{(\rho_0 - \rho) \operatorname{tg} \alpha_M}$ . Если длина нити подвеса равна  $l$ , то расстояния между шариками в воздухе и масле равны  $2l \sin \alpha_B$  в воздухе и  $2l \sin \alpha_M$  в масле, соответственно. Силы электрического взаимодействия равны:

$$F_{ЭВ} = \frac{k_e q^2}{4l^2 \sin^2 \alpha_B} \text{ и } F_{ЭМ} = \frac{k_e q^2}{\epsilon \cdot 4l^2 \sin^2 \alpha_M}.$$

Их отношение  $\frac{F_{ЭВ}}{F_{ЭМ}} = \frac{\epsilon \sin^2 \alpha_B}{\sin^2 \alpha_M}$ . С учетом выражений для  $F_{ЭВ}$  и  $F_{ЭМ}$  получаем:

$$\epsilon = \frac{\rho_0 \operatorname{tg} \alpha_B \cdot \sin^2 \alpha_B}{(\rho_0 - \rho) \operatorname{tg} \alpha_M \cdot \sin^2 \alpha_M}; \quad \epsilon = 2,4.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Чем отличается поведение полярных и неполярных молекул при внесении их в электрическое поле?
2. Полярный диэлектрик находится в постоянном внешнем электрическом поле. Как изменится величина напряженности поля в диэлектрике при его нагревании?
3. На каком расстоянии от точечного заряда, помещенного в воду, напряженность электрического поля будет такой же, как в воздухе на расстоянии 0,18 м от заряда?
4. Определите расстояние от точечного заряда, находящегося в масле, на котором электрический потенциал имеет такое же значение, что и на расстоянии 0,005 м от заряда, помещенного в воду. Диэлектрическая проницаемость масла 2,5.
5. Два точечных заряда в масле взаимодействуют с силой 0,84 Н, а в керосине – с силой 1,00 Н. В обоих случаях расстояние между зарядами одно и то же. Определите диэлектрическую проницаемость керосина, если для масла она равна 2,5.
6. Сила взаимодействия двух точечных зарядов в воздухе равна 8,6 мН. С какой силой будут взаимодействовать заряды в глицерине, если расстояние между ними уменьшить в 4 раза?

### а. Электрическая емкость конденсатора

Для работы многих электротехнических и радиотехнических устройств необходимо аккумулировать электрические заряды, чтобы их в дальнейшем использовать.

**Конденсатор** – прибор, позволяющий аккумулировать электрические заряды, представляет собой систему, состоящую из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, при этом расстояние между обкладками гораздо меньше их линейных размеров.

Если обкладки присоединить к клеммам источника электрического напряжения, например, электростатической машины, то они зарядятся одинаковыми по величине и противоположными по знаку зарядами  $+q$  и  $-q$ .

Величина электрического заряда на одной из обкладок называется **зарядом конденсатора**.

Конденсатор можно также зарядить, соединив одну из обкладок с источником электрического напряжения, а другую – с Землей. На эту обкладку благодаря электростатической индукции переходят заряды с Земли.

Линии напряженности электрического поля направлены от положительной обкладки к отрицательной. Поскольку заряды обкладок равны по модулю, а расстояние между ними мало, то электрическое поле сконцентрировано в пространстве между обкладками.

В п. 4.3, б было отмечено, что линии напряженности электрического поля направлены в сторону убывания потенциала. Следовательно, потенциал положительной обкладки  $\varphi_1$  больше, чем потенциал отрицательной обкладки  $\varphi_2$ .

При изучении электрического поля точечного заряда было установлено, что его напряженность прямо пропорциональна величине электрического заряда  $q$ , создающего это поле. Принимая во внимание связь между разностью потенциалов и напряженностью электрического поля (4.22), мы можем утверждать, что разность потенциалов поля точечного заряда прямо пропорциональна величине заряда:  $(\varphi_1 - \varphi_2) \sim q$ . Это утверждение справедливо и для конденсатора.

Переходя к равенству, запишем:

$$q = C (\varphi_1 - \varphi_2) \quad \text{или} \quad q = CU, \quad (4.32)$$

где  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  – это электрическое напряжение между обкладками, а величина  $C$  – коэффициент пропорциональности, называемый **электрической емкостью конденсатора**.

Электрическая емкость конденсатора из (4.32) равна:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} \quad \text{или} \quad C = \frac{q}{U}. \quad (4.33)$$

**Емкость конденсатора** – это физическая величина, равная отношению заряда конденсатора к электрическому напряжению между его обкладками.

Единица емкости:

$$[C] = \frac{[q]}{[U]} = \frac{\text{Кл}}{\text{В}} = \text{Ф}.$$

Единица емкости в СИ называется **фарад** (Ф) в честь известного английского физика Майкла Фарадея (1791–1867).

**Фарад** – это емкость такого конденсатора, разность потенциалов между обкладками которого равна 1 В при сообщении обкладкам разноименных зарядов по 1 Кл.

Поскольку фарад – очень большая единица, на практике используются его доли:

<b>микрофарад:</b>	1 мкФ = $10^{-6}$ Ф;
<b>нанофарад:</b>	1 нФ = $10^{-9}$ Ф;
<b>пикофарад:</b>	1 пФ = $10^{-12}$ Ф.

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров его обкладок, от их взаимного расположения, а также от электрических свойств вещества между обкладками. Ниже мы это утверждение подтвердим на конкретном примере.

Проанализируем последнюю из отмеченных зависимостей, рассмотрев конденсатор с воздушной прослойкой между обкладками. Обозначим через  $U_0$  электрическое напряжение между обкладками, заряд конденсатора равен  $q$ . Емкость этого конденсатора в вакууме (воздухе) равна:

$$C_0 = \frac{q}{U_0}.$$

При внесении между обкладками диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  электрическое напряжение уменьшится в  $\epsilon$  раз (если заряд  $q$  остался неизменным) и станет равным

$$U = \frac{U_0}{\epsilon}.$$

Соответственно емкость конденсатора равна:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{q\epsilon}{U_0} = \epsilon C_0.$$

Как следствие при размещении диэлектрика между обкладками конденсатора его электрическая емкость становится в  $\epsilon$  раз больше, чем вакуумного (воздушного) конденсатора.

$$C = \epsilon C_0. \tag{4.34}$$

## б. Электрическая емкость плоского конденсатора

**Конденсатор** называется **плоским**, если его обкладки представляют собой плоские параллельные пластины, разделенные диэлектриком.

Чтобы установить зависимость емкости плоского конденсатора от его параметров, проведем эксперимент (рис. 4.31).

I. Обкладка A конденсатора соединена со стержнем электрометра, обкладка B – с его корпусом. Конденсатор заряжается от

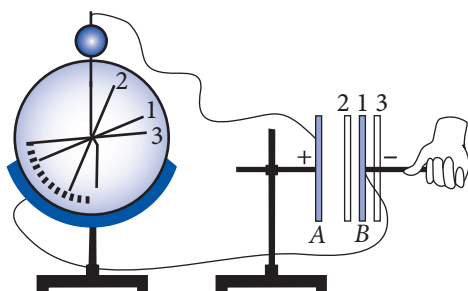


Рис. 4.31

электростатической машины, при этом обкладка  $B$  находится в положении 1. Стрелка электрометра устанавливается у отметки 1, показывая напряжение между обкладками.

Изменим расстояние между обкладками. При его уменьшении (обкладка  $B$  в положении 2) электрическое напряжение уменьшилось, а электрический заряд конденсатора остался прежним. Из выражения (4.33) следует, что емкость конденсатора в этом случае увеличилась. При увеличении расстояния между обкладками (положение 3 обкладки  $B$ ) электрическое напряжение увеличивается, а емкость уменьшается. Таким образом, емкость плоского воздушного конденсатора  $C_0$  обратно пропорциональна расстоянию между обкладками:

$$C_0 \sim 1/d.$$

II. Установим подвижную обкладку  $B$  в положение 1 и сместим вертикально так, чтобы она осталась в той же плоскости. Площадь перекрытия обкладок уменьшилась. Электрометр показывает увеличение напряжения, что соответствует уменьшению емкости конденсатора. Следовательно, емкость конденсатора прямо пропорциональна площади перекрытия пластин:

$$C_0 \sim S.$$

Объединив все полученные результаты, запишем:

$$C_0 \sim \frac{S}{d}.$$

Как показывают расчеты, коэффициент пропорциональности для плоского воздушного конденсатора равен электрической постоянной  $\epsilon_0$ . Таким образом,

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d}. \quad (4.35)$$

Подставив (4.35) в (4.34), получим формулу для емкости плоского конденсатора, пространство между обкладками которого заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}. \quad (4.36)$$

Итак, емкость плоского конденсатора зависит от размеров и взаимного расположения его обкладок и диэлектрика между ними.

Характер зависимости (4.35) можно объяснить достаточно просто. На большей площади обкладок  $S$  электрические заряды расположены на больших расстояниях друг от друга и отталкиваются слабее. Таким образом, конденсатор с большей площадью обкладок аккумулирует больше электрических зарядов при том же напряжении между ними и его емкость больше.

Рассмотрим плоский конденсатор, соединенный с источником постоянного напряжения. При меньших расстояниях между обкладками  $d$  разноименные заряды притягиваются сильнее. Конденсатор при том же значении напряжения аккумулирует больше зарядов, его емкость больше.

Из формулы (4.35) выразим электрическую постоянную

$$\epsilon_0 = \frac{C_0 d}{S}.$$



Отсюда установим ее единицу:

$$[\epsilon_0] = \frac{[C_0][d]}{[S]} = \frac{\Phi \cdot \text{м}}{\text{м}} = \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

Таким образом, мы получим единицу  $\epsilon_0$ , эквивалентную установленной ранее (см. таблицу п. 4.2):

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

Широкое применение находят бумажные конденсаторы, в которых обкладками являются две полосы фольги, изолированные друг от друга полосами парафинированной бумаги (рис. 4.32). Полосы фольги и бумаги сворачивают в рулон для уменьшения пространственных размеров конденсатора. Этот рулон помещают в металлический корпус для защиты от механических повреждений. Из корпуса сделаны два вывода для подключения конденсатора в электрическую цепь. На приборе указывают емкость и номинальное напряжение. Конденсатор используется только при напряжениях, не превышающих номинальное, которое может достигать нескольких десятков киловольт. При напряжениях, превышающих номинальное, между обкладками происходит электрический разряд, повреждающий диэлектрик (рис. 4.32).

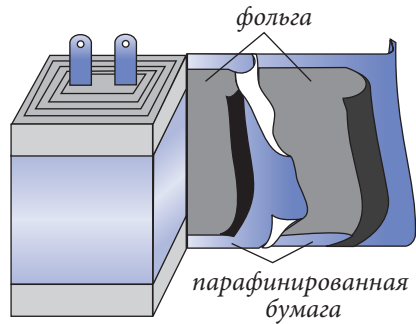


Рис. 4.32

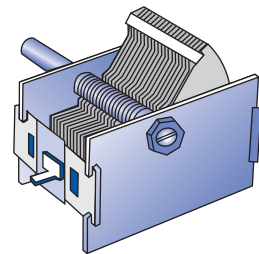


Рис. 4.33

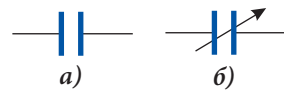


Рис. 4.34

В радиотехнике используются конденсаторы переменной емкости. Они представляют собой две системы металлических пластин, изолированные друг от друга. Одна система пластин неподвижна, вторая может вращаться так, что площадь их перекрытия изменяется (рис. 4.33).

На рисунке 4.34 показано обозначение конденсаторов: а) постоянной емкости; б) переменной емкости.

### в.\* Соединение конденсаторов

На практике часто бывают необходимы емкости, отличные от номинальных. В таких случаях прибегают к соединению конденсаторов в группы (батареи), обладающие необходимой емкостью.

Рассмотрим самые простые способы соединения (**параллельное** и **последовательное**) для определения емкости конденсатора, эквивалентного данному соединению.

**Параллельное соединение** конденсаторов показано на рисунке 4.35. Замечаем, что разность потенциалов между клеммами батареи и между обкладками каждого из конденсаторов

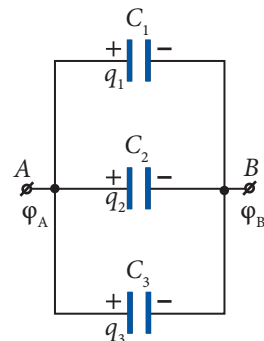


Рис. 4.35

одинакова ( $\varphi_A - \varphi_B$ ). Очевидно, заряд конденсатора, эквивалентного параллельному соединению  $q_{\text{пар.}}$  равен сумме зарядов всех конденсаторов:

$$q_{\text{пар.}} = q_1 + q_2 + q_3. \quad (4.37)$$

Согласно формуле (4.32) значения электрических зарядов равны:

$$q_{\text{пар.}} = C_{\text{пар.}}(\varphi_A - \varphi_B), \quad q_1 = C_1(\varphi_A - \varphi_B), \quad q_2 = C_2(\varphi_A - \varphi_B), \quad q_3 = C_3(\varphi_A - \varphi_B),$$

где  $C_{\text{пар.}}$  – электроемкость всего соединения. Подставив эти значения зарядов в (4.37) и сократив на разность потенциалов, получим:

$$C_{\text{пар.}} = C_1 + C_2 + C_3. \quad (4.38)$$

**Электроемкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей всех конденсаторов.**

**Последовательное соединение** конденсаторов показано на *рисунке 4.36*. Если к зажимам батареи приложить разность потенциалов ( $\varphi_A - \varphi_B$ ), то все конденсаторы благодаря электростатической индукции зарядятся одинаковым зарядом  $q$  (считается, что до соединения конденсаторы были разряжены). Обкладки двух соседних конденсаторов и соединяющий их провод образуют единый проводник, общий заряд которого равен 0, а все точки имеют одинаковый потенциал. На *рисунке 4.36* прерывистой линией обведен один такой проводник. Все его точки имеют потенциал  $\varphi_C$  и заряд  $(-q + q) = 0$ . Для разности потенциалов (напряжения) между зажимами батареи получим:

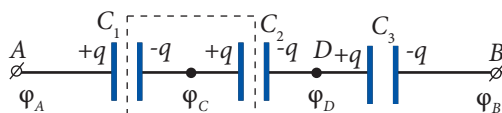


Рис. 4.36

$$\varphi_A - \varphi_B = (\varphi_A - \varphi_C) + (\varphi_C - \varphi_D) + (\varphi_D - \varphi_B), \quad (4.39)$$

т.е. электрическое напряжение между зажимами батареи равно сумме напряжений соединения.

Обозначим через  $C_{\text{посл.}}$  электроемкость батареи последовательно соединенных конденсаторов. В соответствии с (4.33) имеем:

$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{q}{C_{\text{посл.}}}, \quad \varphi_A - \varphi_C = \frac{q}{C_1}, \quad \varphi_C - \varphi_D = \frac{q}{C_2} \quad \text{и} \quad \varphi_D - \varphi_B = \frac{q}{C_3}.$$

Подставив эти значения в выражение (4.39) и сократив на заряд  $q$ , получим

$$\frac{1}{C_{\text{посл.}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}. \quad (4.40)$$

**Величина, обратная емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов, равна сумме величин, обратных емкостям всех соединенных конденсаторов.**

Из формул (4.38) и (4.40) видно, что при параллельном соединении емкость батареи больше, чем емкость каждого из конденсаторов, а при последовательном соединении, наоборот, емкость батареи меньше емкости каждого из конденсаторов.

Возможно также смешанное соединение, при котором одни конденсаторы соединены параллельно, а другие – последовательно.

### г.\* Электрическая емкость уединенного проводника

Уединенным называется проводник, если он находится на очень больших расстояниях от других проводящих тел.

Выражение для электроемкости уединенного проводника может быть получено из формулы (4.33), определяющей емкость конденсатора. Считаем, что одна из обкладок конденсатора, например отрицательно заряженная, находится на таком большом расстоянии от положительно заряженной, что ее потенциал практически равен нулю:  $\varphi_2 = 0$ .

Тогда для электроемкости уединенного проводника получим:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (4.41)$$

Электроемкость уединенного проводника равна отношению его заряда к электрическому потенциалу.

Вычислим электроемкость проводящего шара радиуса  $R$ . Электрическое поле проводящего шара вне его и на поверхности такое же, как поле точечного заряда, равного заряду шара и помещенного в его центр. Электрический потенциал точечного заряда на расстоянии  $R$  от него вычисляется по формуле (4.24):

$$\varphi_0 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}.$$

Подставив это выражение в формулу (4.41), получим электроемкость уединенного проводящего шара, расположенного в вакууме:

$$C_0 = 4\pi\epsilon_0 R. \quad (4.42)$$

Если шар находится в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , то его электроемкость согласно (4.34) равна:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon R. \quad (4.43)$$

Вычислим емкость Земли, считая ее проводящим шаром радиуса  $R = 6400 \text{ км} = 6,4 \cdot 10^6 \text{ м}$ . Из формулы (3.42) получаем  $C_3 \approx 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ Ф} = 710 \text{ мкФ}$ . Убеждаемся, что уединенные проводники имеют небольшую емкость.

Для сравнения вычислим размер обкладок плоского конденсатора, имеющего емкость, равную емкости Земли. Допустим, что расстояние между обкладками  $d = 1 \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м}$ , а пространство между ними заполнено парафином ( $\epsilon = 2,2$ ).

Из формулы (4.36) выразим площадь обкладок:

$$S = \frac{Cd}{\epsilon_0\epsilon}.$$

Выполнив вычисления, получим  $S \approx 4000 \text{ м}^2$ . Это площадь квадрата со стороной примерно 65 м, что в 100 000 раз меньше радиуса Земли.

Этот пример демонстрирует предпочтительность использования конденсаторов по сравнению с изолированными проводниками в качестве приборов для накопления электрических зарядов.

## Пример решения задачи

1

### Дано:

$$S = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

$$d = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

$$\varepsilon = 6,$$

$$U_0 = 9 \text{ В},$$

$$\text{а) } q = \text{const},$$

$$\text{б) } U = \text{const}$$

$$q, U, E - ?$$

Площадь пластин плоского конденсатора равна  $64 \text{ см}^2$ , расстояние между ними –  $0,5 \text{ мм}$ , диэлектрическая проницаемость диэлектрика между пластинами –  $6$ . Конденсатор заряжен до напряжения  $9 \text{ В}$ . Определите электрический заряд, напряжение и напряженность электрического поля между пластинами, если диэлектрик удален, при этом конденсатор: а) отключен от источника напряжения; б) остался подключенным к источнику напряжения.

### Решение

а) Если конденсатор отключен от источника напряжения, то его электрический заряд остается неизменным. Емкость конденсатора с диэлектриком  $C_a = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d}$  и электрический заряд до отключения от источника  $q_a = C_a U_0 = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d} U_0$ ;  $q_a = 6,12 \cdot 10^{-9} \text{ Кл} = 6,12 \text{ нКл}$ .

Этот заряд останется на конденсаторе и после удаления диэлектрика, когда емкость уменьшится в  $\varepsilon$  раз. Но это уменьшение емкости при неизменном заряде сопровождается увеличением напряжения в  $\varepsilon$  раз ( $q = CU = \text{const}$ ). Оно становится равным  $U_a = \varepsilon U_0$ ,  $U_a = 54 \text{ В}$ . Напряженность электрического поля в пространстве между обкладками  $E_a = U_a/d$ ,  $E_a = 1,08 \cdot 10^5 \text{ В/м} = 108 \text{ кВ/м}$ .

б) Если конденсатор остался подключенным к источнику напряжения, то величина напряжения не изменяется:  $U_6 = U_0 = 9 \text{ В}$ . Напряженность электрического поля внутри конденсатора

$$E_6 = \frac{U_6}{d}, \quad E_6 = 1,08 \cdot 10^4 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 18 \frac{\text{кВ}}{\text{м}}.$$

Электроемкость конденсатора без диэлектрика  $C_6 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$  и заряд конденсатора

$$q_6 = C_6 U_6 = \varepsilon \frac{S}{d} U_6; \quad q_6 = 1,02 \text{ нКл}.$$

## Пример решения задачи

2

### Дано:

$$C_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

$$C_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

$$C_3 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$$

$$C_4 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

$$C - ?$$

Электроемкости конденсаторов батареи, представленной на рисунке 4.37, равны:  $C_1 = 3 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 2 \text{ мкФ}$ ,  $C_3 = 5 \text{ мкФ}$  и  $C_4 = 4 \text{ мкФ}$ . Вычислить эквивалентную электроемкость батареи.

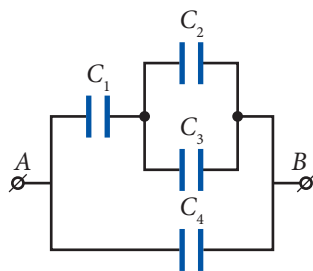


Рис. 4.37

### Решение

Решение задач подобного типа начинается с выявления некоторых элементов, в данном случае конденсаторов, соединенных только последова-

тельно или параллельно. Применяв соответствующее правило, заменяем эти элементы на один и получаем более простую эквивалентную схему. Эта процедура повторяется, пока не будет получен ожидаемый результат. Этот метод называется методом **преобразований**. В батарее на *рисунке 4.37* конденсаторы  $C_2$  и  $C_3$  соединены параллельно, они эквивалентны конденсатору с емкостью  $C_{23} = C_2 + C_3$ . Для обозначения эквивалентного конденсатора рекомендуется использовать совокупность индексов заменяемых конденсаторов. Таким образом, получаем эквивалентную схему, показанную на *рисунке 4.38, а*. Конденсаторы с емкостями  $C_1$  и  $C_{23}$  соединены последовательно. Они могут быть заменены на эквивалентный конденсатор, электрическая емкость которого определяется по формуле:

$$\frac{1}{C_{123}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_{23}}.$$

Получаем  $C_{123} = \frac{C_1 \cdot C_{23}}{C_1 + C_{23}} = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3}$  и эквивалентную схему на *рисунке 4.38, б*.

Электрическая емкость батареи конденсаторов на *рисунке 4.37* равна

$$C = C_{123} + C_4 = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3} + C_4;$$

$$C = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 6,1 \text{ мкФ}.$$

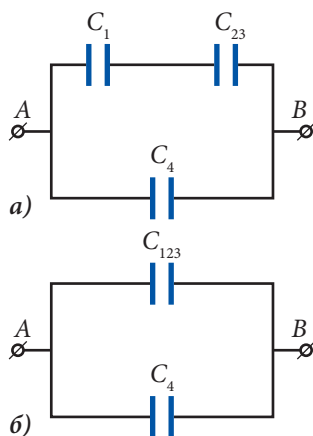


Рис. 4.38

**Пример решения задачи\***

**3**

**Дано:**

$C_0 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф},$   
 $\epsilon = 2,1$

$C_a, C_6 - ?$

Емкость плоского воздушного конденсатора равна 4 мкФ. Вычислите емкость конденсатора, если половина его объема погружена в керосин (диэлектрическая проницаемость керосина 2,1). Рассмотрите два случая (*рис. 4.39*):

- а) пластины конденсатора вертикальны;
- б) пластины горизонтальны.

**Решение**

а) В случае, представленном на *рисунке 4.39, а*, нижняя половина конденсатора заполнена диэлектриком (керосин), верхняя – воздухом. Согласно формуле для емкости плоского конденсатора  $C = \epsilon_0 \epsilon \frac{S}{d}$ . Емкость половины конденсатора с площадью пластин  $S/2$  вдвое меньше. Следовательно, емкость верхней половины конденсатора равна  $C_0/2$ , нижней –  $\epsilon C_0/2$ . Эти две половины соединены параллельно, общая емкость равна:

$$C_a = \frac{C_0}{2} + \epsilon \frac{C_0}{2} = \frac{(\epsilon + 1) C_0}{2}; \quad C_a = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 6,2 \text{ мкФ}.$$

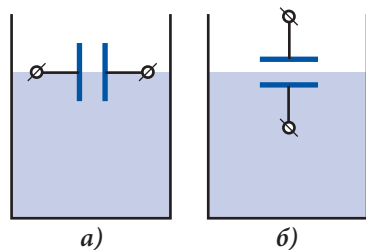


Рис. 4.39

- 6) Конденсатор на *рисунке 4.39, б* эквивалентен системе двух конденсаторов, соединенных последовательно. Поверхность жидкости внутри конденсатора имеет заряды  $+q$  и  $-q$ , где  $q$  – заряд конденсатора. Эти заряды вместе с теми, что находятся на пластинах данного конденсатора, являются зарядами двух последовательно соединенных конденсаторов с расстоянием между пластинами, равным  $d/2$ , где  $d$  – расстояние между пластинами первоначального конденсатора. Согласно формуле для емкости плоского конденсатора верхний конденсатор имеет емкость, равную  $2C_0$ , а нижний –  $2\epsilon C_0$ . Общая емкость системы конденсаторов, соединенных последовательно, равна:

$$\frac{1}{C_6} = \frac{1}{2C_0} + \frac{1}{2\epsilon C_0} = \frac{\epsilon + 1}{2\epsilon C_0}. \text{ Получаем: } C_6 = \frac{2\epsilon C_0}{\epsilon + 1}; C_6 = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 5,4 \text{ мкФ}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ<sup>1</sup>

1. Что представляет собой конденсатор? Как определяется его электроемкость?
2. Верно ли утверждение: емкость конденсатора прямо пропорциональна заряду на нем и обратно пропорциональна электрическому напряжению между обкладками? Аргументируйте ответ.
3. От чего зависит электроемкость конденсатора? Аргументируйте ответ, используя выражение для емкости плоского конденсатора.
4. Как объясняется зависимость электроемкости конденсатора от диэлектрической проницаемости диэлектрика между обкладками?
5. Площадь перекрытия пластин конденсатора переменной емкости была уменьшена в 1,5 раза. Как изменилась емкость конденсатора?
- 6.\* Металлическая тонкостенная сфера и однородный металлический шар имеют одинаковые радиусы. Что можно утверждать относительно величин электроемкости этих тел?
7. Определите емкость конденсатора, который при подключении к источнику напряжения 12 В накапливает заряд, равный  $8,4 \cdot 10^{-7}$  Кл.
8. Электроемкость конденсатора, погруженного в глицерин, равна 645 пФ. Чему будет равна емкость конденсатора, если глицерин заменить водой?
9. Конденсатор с этиловым спиртом в качестве диэлектрика заряжен от источника напряжения 215 В, а затем отсоединен от него. Чему будет равно напряжение между обкладками конденсатора, если этиловый спирт заменить глицерином?
10. Чему равна электрическая емкость системы, состоящей из двух квадратных проводящих пластин со стороной 12 см, расположенных параллельно друг другу и разделенных слоем парафина толщиной 1 мм. Парафин полностью заполняет объем между пластинами. Вычислите электрический заряд на пластинах при разности потенциалов между ними, равной 200 В?
11. Электрический заряд плоского воздушного конденсатора равен 26,55 нКл, площадь пластин – 100 см<sup>2</sup>, расстояние между ними – 0,5 мм. Чему равна разность потенциалов между пластинами?
- 12.\* Электроемкость двух параллельно соединенных конденсаторов равна 5,0 нФ, а последовательно соединенных – 1,2 нФ. Определите емкости входящих в соединения конденсаторов.
- 13.\* Для работы электронного прибора необходим конденсатор, имеющий емкость 5,4 мФ. Конденсатор какой емкости нужно соединить с конденсатором емкостью 3,2 мФ, чтобы получить необходимую емкость? Как следует соединить эти конденсаторы?
- 14.\* Электрические емкости конденсаторов в схеме, представленной на *рисунке 4.40*, равны  $C_1 = 3$  мкФ,  $C_2 = 7$  мкФ,  $C_3 = 6$  мкФ и  $C_4 = 14$  мкФ. Определить емкость батареи для случаев: а) ключ  $K$  разомкнут; б) ключ  $K$  замкнут.

<sup>1</sup> При решении задач из этой рубрики значения диэлектрической проницаемости брать из *таблицы* п. 4.5.

15.\* Электроемкость плоского воздушного конденсатора равна 140 пФ. В конденсатор вводится фарфоровая пластина ( $\epsilon = 6$ ) параллельно его обкладкам. Площадь пластины равна площади обкладок, а толщина – половине расстояния между ними. Вычислите емкость конденсатора, полученного таким образом, и покажите, что эта величина не зависит от положения введенной пластины (от расстояния между пластиной и одной из обкладок).

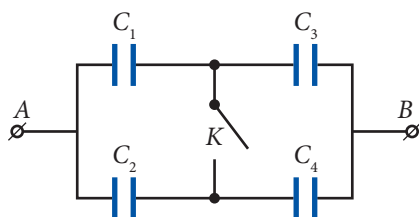


Рис. 4.40

16.\* Батарея из двух конденсаторов с емкостями 0,2 мФ и 0,3 мФ, соединенных последовательно, подключена к источнику напряжения 9 В. Определите электрические заряды конденсаторов и напряжение между обкладками каждого из конденсаторов.

17.\* Конденсатор электроемкостью 72 пФ заряжен до напряжения 40 В. Конденсатор отсоединили от источника, затем его обкладками соединили с незаряженным конденсатором. Определить электроемкость второго конденсатора, если напряжение между обкладками соединенных конденсаторов равно 24 В.

## 4.7 ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Представим себе конденсатор, заряженный и отключенный от источника напряжения. Заряды на его обкладках разноименны и взаимно притягиваются. Если одна из них свободна, то она будет двигаться ускоренно ко второй обкладке, т.е. со все возрастающими скоростью и кинетической энергией. Это возрастание кинетической энергии может происходить только за счет уменьшения энергии заряженного конденсатора.

Проведем опыт, чтобы выявить факторы, от которых зависит энергия заряженного конденсатора. Для этого соберем цепь, показанную на рисунке 4.41. В положении 1 переключателя *Кл* конденсатор заряжается до напряжения *U*. При переводе переключателя в положение 2 происходит разряд конденсатора через электрическую лампочку *Л* и наблюдается кратковременная вспышка света. Энергия заряженного конденсатора была потрачена на накаливание нити лампочки и излучение ею света.

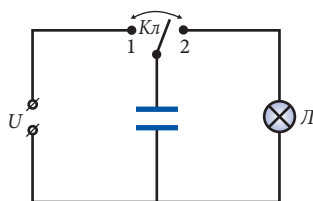


Рис. 4.41

При замене конденсатора другим, большей емкости, обнаруживается, что при том же напряжении между обкладками наблюдаемая вспышка света ярче.

Если прежний конденсатор заряжать до разных напряжений, то выясняется, что более яркая вспышка света наблюдается при бóльших напряжениях. Таким образом, опыт показывает, что энергия заряженного конденсатора возрастает при увеличении его емкости и напряжения между обкладками.

Энергия заряженного конденсатора используется, например, для получения мощных вспышек света в фотоаппаратах.

Чтобы упростить вывод формулы для энергии заряженного конденсатора, рассмотрим плоский конденсатор. Допустим, что линейные размеры пластин много больше расстояния между ними. В этом приближении электрическое поле между

обкладками можно считать однородным во всем объеме, а неоднородностью у краев пластин можно пренебречь.

Линии напряженности поля перпендикулярны пластинам, величина напряженности определяется зарядом конденсатора. Пластина 1 (рис. 4.42) заряжена положительным зарядом. Вектор напряженности  $\vec{E}_1$  поля, создаваемого зарядом этой пластины, направлен от нее, а вектор напряженности  $\vec{E}_2$  поля, создаваемого отрицательным зарядом пластины 2, направлен к этой пластине. Заряды на пластинах одинаковы по модулю, поэтому и напряженности полей, создаваемых ими, равны по величине:  $|\vec{E}_1| = |\vec{E}_2|$ . В соответствии с принципом суперпозиции напряженность результирующего поля  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ . В пространстве между пластинами векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  направлены одинаково, следовательно  $E = E_1 + E_2 = 2E_1$ . В пространстве вне пластин векторы  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$  имеют противоположное направление, поэтому напряженность результирующего поля равна нулю. Таким образом, электрическое поле заряженного конденсатора сосредоточено в пространстве между его обкладками.

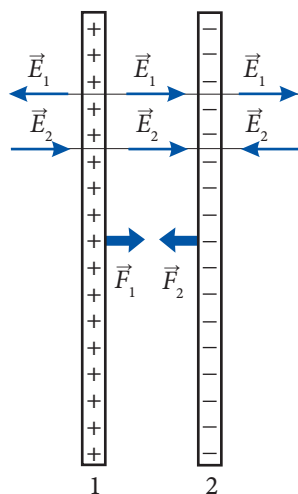


Рис. 4.42

Вычислим силу притяжения, действующую на одну из пластин конденсатора. Ее заряд  $q$  находится в электрическом поле, создаваемом зарядом другой пластины. Напряженность этого поля  $E_1 = E/2$ , следовательно, в соответствии с формулой (4.10), сила, действующая на одну из пластин, равна  $F_1 = F_2 = qE_1 = qE/2$ .

Электрическое поле между пластинами однородно, значит, величина этой силы не зависит от расстояния между пластинами, если оно остается много меньшим по сравнению с линейными размерами пластин.

Зарядка конденсатора состоит в разделении электрических зарядов – заряды одного знака перемещаются с одной пластины на другую, пластины в результате заряжаются одинаковыми по величине, но разными по знаку зарядами.

На рисунке 4.43 показано, как можно представить себе процесс зарядки конденсатора: в первоначальном состоянии пластины касаются друг друга, а на поверхности соприкосновения находятся заряды  $+q$  и  $-q$ , т.е. суммарный заряд равен нулю (на рисунке пластина 2 в первоначальном положении показана штриховой линией). При разделении пластин конденсатор оказывается заряженным.

Энергия заряженного конденсатора равна работе внешних сил, совершаемой при раздвижении пластин, подобно тому, как потенциальная энергия тела, находящегося над поверхностью Земли, равна механической работе, совершаемой для его подъема. Получаем  $W_p = A_{\text{сов}}$ . При равномерном движении пластины сила  $F = F_1$ . Работа, совершаемая для удаления пластин на расстояние  $d$ , равна:

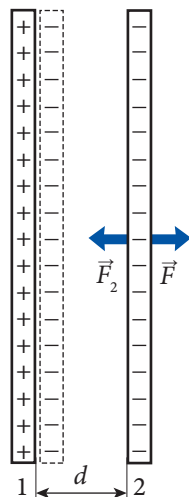


Рис. 4.43

$$A_{\text{сов}} = Fd = q \frac{E}{2} d.$$



Согласно соотношениям (4.23) и (4.18) произведение  $Ed = U$  – напряжение между обкладками конденсатора. Таким образом, совершенная работа

$$A_{\text{сов.}} = \frac{1}{2} qU.$$

Следовательно, энергия заряженного конденсатора

$$W_{\text{н}} = \frac{1}{2} qU. \quad (4.44)$$

Это потенциальная энергия, так как зависит от взаимного положения пластин, что было показано выше.

Используя определение электрической емкости (4.33), выражение (4.44) может быть записано еще и по-другому:

$$W_{\text{н}} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (4.45)$$

Можно показать, что полученные выражения для энергии плоского конденсатора справедливы для конденсаторов любой формы.

Вернемся к формуле для энергии (3.45). Подставим в нее выражение (4.36) для емкости плоского конденсатора и соотношение  $U = Ed$ . Получим:

$$W_{\text{н}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} (Ed)^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \cdot Sd.$$

Произведение  $Sd = V$  – это объем пространства между обкладками конденсатора, занимаемый электрическим полем. Таким образом:

$$W_{\text{н}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \cdot V. \quad (4.46)$$

Энергия заряженного конденсатора локализована в пространстве между пластинами, где сконцентрировано электрическое поле.

Разделив энергию конденсатора  $W_{\text{н}}$  на объем, получим энергию единицы объема электрического поля, называемую **объемной плотностью энергии электрического поля**:

$$w_{\text{э}} = \frac{W_{\text{н}}}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2}. \quad (4.47)$$

**Плотность энергии электрического поля пропорциональна квадрату напряженности электрического поля.**

**Пример решения задачи\* 1**

**Дано:**  
 $C_1 = 1 \cdot 10^{-6}$  Ф,  
 $C_2 = 4 \cdot 10^{-6}$  Ф,  
 $U_1 = 9$  В,  
 $U_2 = 4$  В  
 $\Delta W - ?$

Два конденсатора с электроемкостями, равными 1 мкФ и 4 мкФ, подключены к источникам напряжения 9 В и 4 В соответственно. Определите изменение энергии системы конденсаторов после отключения от источников напряжения и параллельного соединения пластин, заряженных:  
**а)** одноименно;  
**б)** разноименно.  
 Проанализируйте полученные результаты.

## Решение

Заряды конденсаторов не изменятся при отключении их от источников электрического напряжения, они равны  $q_1 = C_1 U_1$  и  $q_2 = C_2 U_2$ . При соединении обкладок этих конденсаторов получается параллельное соединение, емкость которого  $C = C_1 + C_2$ .

Рассмотрим случай **а**). При соединении обкладок с одноименным зарядом общий заряд соединения  $q_a = q_1 + q_2$  (согласно закону сохранения электрического заряда). Напряжение между обкладками:

$$U_a = \frac{q_a}{C} = \frac{q_1 + q_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1 U_1 + C_2 U_2}{C_1 + C_2}.$$

Энергия конденсаторов до их соединения:  $W_1 = \frac{C_1 U_1^2}{2} + \frac{C_2 U_2^2}{2}$ , а после соединения:

$$W_{a2} = \frac{C U_a^2}{2} = \frac{(C_1 U_1 + C_2 U_2)^2}{2(C_1 + C_2)}.$$

Изменение энергии системы конденсаторов:

$$\Delta W_a = W_{a2} - W_1 = -\frac{C_1 C_2 (U_1 - U_2)^2}{2(C_1 + C_2)}; \quad \Delta W_a = -10 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = -10^{-5} \text{ Дж}.$$

Аналогично решается задача в случае **б**), при соединении обкладок с разноименными зарядами. Общий заряд всего соединения

$$q_6 = |q_1 - q_2| = |C_1 U_1 - C_2 U_2|.$$

Для изменения энергии системы конденсаторов получим:

$$\Delta W_6 = -\frac{C_1 C_2 (U_1 + U_2)^2}{2(C_1 + C_2)}; \quad \Delta W_6 = -6,76 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}.$$

Видно, что конечная энергия в обоих случаях меньше первоначальной, часть энергии превращается в другие виды энергии. Разность больше при соединении разноименно заряженных пластин, при котором возникает искра (электрический разряд).

## Пример решения задачи\*

**2****Дано:**

$$w_3 = 5 \text{ Дж/м}^3, \\ S = 10 \text{ см}^2$$

 $F - ?$ 

СИ:

$$10^{-3} \text{ м}^2$$

Н

Объемная плотность энергии электрического поля между обкладками плоского конденсатора равна  $5 \text{ Дж/м}^3$ . С какой силой притягиваются обкладки конденсатора, если площадь их общей поверхности равна  $10 \text{ см}^2$ ?

## Решение

В соответствии с (4.47) объемная плотность энергии электрического поля конденсатора

$$w_3 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon E^2,$$

где  $E = F/q$  – напряженность электрического поля,  $F$  – сила притяжения обкладок, а  $q$  – электрический заряд конденсатора.

Используя выражения (4.33) и (4.36) для емкости плоского конденсатора и (4.22), получим:

$$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} = \frac{q}{Ed},$$

откуда

$$\varepsilon_0 \varepsilon E = \frac{q}{S}.$$

Таким образом, для объемной плотности энергии получаем:

$$w_3 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E \cdot E = \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{S} \cdot \frac{F}{q} = \frac{F}{2S}$$

а сила притяжения обкладок равна

$$F = 2Sw_3; F = 10 \text{ мН.}$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какие факторы определяют энергию заряженного конденсатора?
2. Какую опасность таит электрическая цепь, содержащая конденсаторы, после отключения ее от источника электрического напряжения? Как следует поступать, чтобы ее избежать?
3. Напряженность электрического поля между обкладками конденсатора увеличилась в 3 раза. Во сколько раз изменилась энергия конденсатора?
4. Чему равно напряжение, приложенное к обкладкам конденсатора емкостью 30 пФ, если запасенная энергия равна  $2,4 \cdot 10^{-8}$  Дж?
5. Расстояние между пластинами плоского заряженного конденсатора уменьшили в 2 раза. Как изменится энергия конденсатора, если он: а) остается соединенным с источником электрического напряжения; б) отключен от источника?
6. Плоский воздушный конденсатор подключен к источнику электрического напряжения. Энергия заряженного конденсатора равна  $1,5 \cdot 10^{-7}$  Дж. Как изменится энергия конденсатора при уменьшении расстояния между обкладками в 4 раза?
- 7.\* Два конденсатора с емкостями, равными 40 нФ и 24 нФ, соединены последовательно. Вычислите энергию каждого конденсатора, если напряжение, приложенное к этой батарее конденсаторов, равно 32 В.
- 8.\* Два одинаковых воздушных конденсатора соединены последовательно и подключены к источнику электрического напряжения. Энергия батареи конденсаторов равна  $2,5 \cdot 10^{-7}$  Дж. Чему будет равна энергия батареи, если пространство между обкладками одного из конденсаторов заполнено диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной 4?
- 9.\* Маленький шарик, несущий электрический заряд  $q = 8$  мкКл, находится в масле. Чему равна объемная плотность энергии поля, создаваемого шариком в точках, расположенных от его центра на расстоянии 10 см? Диэлектрическая проницаемость масла  $\varepsilon = 2,2$ .

## 4.8\* ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ОДНОРОДНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Действие многих электронных приборов обусловлено движением в них заряженных частиц. Поэтому важно знать, как же они движутся в электрических полях, как можно управлять их движением. Допустим, что заряженные частицы двигаются

в вакууме, чтобы исключить соударения с частицами вещества, изменяющими их движение.

Исследуем движение заряженных частиц в однородном электрическом поле, в котором вектор напряженности  $\vec{E}$  в разных точках пространства один и тот же. Следовательно, электрическая сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ , действующая на частицу с зарядом  $q$  и массой  $m$ , а также сообщенное ей ускорение

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{q}{m}\vec{E} \quad (4.48)$$

остаются постоянными во время движения.

В случае частиц, заряженных положительно ( $q > 0$ ), сила  $\vec{F}$  и ускорение  $\vec{a}$  направлены так же, как вектор  $\vec{E}$ , если же частица заряжена отрицательно ( $q < 0$ ), то векторы  $\vec{F}$  и  $\vec{a}$  направлены противоположно вектору  $\vec{E}$ .

Вычислим ускорение (4.48) протона ( $q_p = +e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$  кг), находящегося в электрическом поле сравнительно малой напряженности:  $E = 100$  В/м. Получаем  $a = 9,57 \cdot 10^9$  м/с<sup>2</sup>. Эта величина примерно в  $10^9$  раз больше ускорения свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>. Во столько же раз и электрическая сила, действующая на протон, больше силы тяжести. Поэтому при изучении движения протона в электрических полях можно учитывать только электрическую силу, пренебрегая силой тяжести. Тем более оправдано пренебрежение силой тяжести для электрона, электрический заряд которого по модулю равен заряду протона, а масса примерно в 1 840 раз меньше.

Следовательно, движение заряженных частиц (протонов, электронов) в однородном электрическом поле – это движение с постоянным ускорением (4.48), подобное движению тел в однородном гравитационном поле (см. *Физика, X класс*, п. 1.9).

Проанализируем несколько конкретных случаев. Вначале рассмотрим случаи, когда заряженная частица попадает в однородное электрическое поле, имея скорость  $\vec{v}_0$ , направленную вдоль линий напряженности.

### Пример решения задачи

1

Протон влетает в однородное электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$  со скоростью  $\vec{v}_0$ , направленной так же, как вектор  $\vec{E}$ . Определите скорость протона в момент времени, когда пройден путь  $s$ .

### Решение

На рисунке 4.44 представлена ситуация, описанная в задаче. Ось  $Oy$  направлена вдоль вектора напряженности и ее начало находится в точке попадания протона в поле. Заряд протона положителен, то есть ускорение направлено так же, как ось  $Oy$ . Следовательно, проекции на нее скорости и ускорения протона равны:

$$v_{0y} = v_0, v_y = v \text{ и } a_y = a = eE/m_p.$$

Протон движется прямолинейно равноускоренно, так же, как тело, падающее вертикально вниз в гравитационном поле Земли.

Искомая скорость может быть определена, исходя из формул равноускоренного движения для координаты и зависимости проекции скорости от времени. Решение будет более простым, если использовать формулу Галилея:

$$v_y^2 - v_{0y}^2 = 2a_y s.$$

Подставив соответствующие величины, получим искомую скорость:

$$v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2eEs}{m_p}}.$$

Произведение  $Es = U$  – это напряжение между точками  $O$  и  $A$ , а  $OA = s$ , как видно из рисунка 4.44. С учетом этого выражение для скорости

принимает вид  $v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2eU}{m_p}}$ . Когда начальная скорость является

относительно низкой и ею можно пренебречь, то

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}}.$$

Этот же результат можно получить из энергетических соображений: изменение кинетической энергии протона

$$W_k - W_{k0} = \frac{m_p v^2}{2} - \frac{m_p v_0^2}{2}$$

равно работе, совершаемой электрическим полем при перемещении протона на расстояние  $s$ :

$$A = qEs = eU.$$

Ситуация, проанализированная в данной задаче, характерна для различных установок, в которых ускоряются заряженные частицы, в таком случае  $U$  называется **ускоряющим напряжением (ускоряющей разностью потенциалов)**.

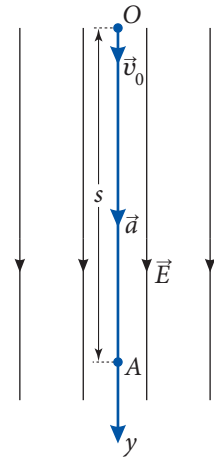


Рис. 4.44

### Пример решения задачи

2

Электрон со скоростью  $v_0$  попадает в пространство между пластинами плоского конденсатора через отверстие  $O$  в положительно заряженной пластине (рис. 4.45). Напряжение между пластинами равно  $U$ , расстояние между ними –  $d$ . Определить:

- время до остановки (измеренное с момента попадания в конденсатор);
- путь, пройденный до остановки;
- при каких условиях электрон останавливается между пластинами;
- продолжительность нахождения электрона внутри конденсатора.

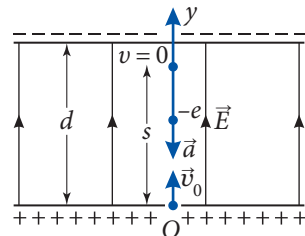


Рис. 4.45

### Решение

**а)** Направим ось  $Oy$ , как показано на рисунке. Заряд электрона отрицателен ( $q_e = -e$ ), поэтому ускорение его (4.48) направлено противоположно начальной скорости:

$$v_{0y} = v_0 \text{ и } a_y = -\frac{e}{m_e}E, \text{ но } E = \frac{U}{d}, \text{ следовательно, } a_y = -\frac{eU}{m_e d}.$$

После попадания в пространство между обкладками электрон движется равномерно. В какой-то момент он останавливается, а затем равноускоренно перемещается в направлении, противоположном оси  $Oy$ . Электрон двигается так же, как тело, брошенное вертикально вверх в однородном гравитационном поле. Проекция скорости электрона на ось  $Oy$  равна  $v_y = v_{0y} + a_y t$ .

С учетом выражения для  $a_y$ :

$$v_y = v_0 - \frac{eU}{m_e d} t.$$

В момент остановки  $v_y = 0$ . Время движения электрона в конденсаторе до остановки:

$$t_1 = \frac{m_e v_0 d}{eU}.$$

**б)** Подставив это время в выражение для координаты  $y = v_0 t + \frac{a_y t^2}{2}$ , получаем  $y = v_0 t_1 - \frac{eU}{2m_e d} t_1^2$ , и путь, пройденный электроном между обкладками конденсатора до остановки  $s = \frac{m_e v_0^2}{2eU} d$ . Такое же выражение для  $s$  получится, если использовать формулу Галилея и исходя из энергетических соображений.

**в)** Электрон останавливается между пластинами, то есть  $s < d$ . С учетом выражения для пути  $s$ , получим условие:

$$\frac{m_e v_0^2}{2} < eU.$$

Электрон останавливается в пространстве между пластинами, если его кинетическая энергия  $\frac{m_e v_0^2}{2}$  в момент попадания в конденсатор недостаточна для совершения необходимой работы по достижению отрицательной пластины, которая его отталкивает.

**г)** Продолжительность движения электрона от момента остановки до выхода из конденсатора также равна  $t_1$ . Это ясно из условия  $y = 0$ , которое было использовано для показа, что длительность падения тела, брошенного вертикально вверх, равна времени подъема. Таким образом, электрон находится между обкладками конденсатора в течение времени

$$t = 2t_1 = \frac{2m_e v_0 d}{eU}.$$

Проанализируем случай, когда начальная скорость  $v_0$  заряженной частицы перпендикулярна вектору  $\vec{E}$  напряженности однородного электрического поля. В таких задачах не учитывается неоднородность поля на краях конденсатора.

### Пример решения задачи

3

Электрон влетает в пространство между пластинами плоского конденсатора со скоростью  $v_0$ , параллельной пластинам. Длина пластин в направлении скорости  $v_0$  равна  $l$ , расстояние между пластинами –  $d$ , напряжение –  $U$ . Определить:

а) отклонение электрона на выходе из конденсатора от направления начальной скорости;

- б) кинетическую энергию электрона на выходе из конденсатора;  
 в) угол между направлением начальной скорости и вектором скорости на выходе из конденсатора.

### Решение

а) Ситуация, описанная в задаче, представлена на рисунке 4.46. Система отсчета берет начало в точке попадания электрона в поле, ось  $Ox$  направлена вдоль вектора  $v_0$ , а ось  $Oy$  – в направлении ускорения электрона.

Проекции ускорения на оси координат равны:

$$a_x = 0, a_y = \frac{eU}{m_e d}.$$

Следовательно, движение электрона можно разложить на два прямолинейных: равномерное вдоль оси  $Ox$  и равноускоренное вдоль оси  $Oy$ . Это движение подобно движению тела, брошенного горизонтально в однородном гравитационном поле.

По аналогии записываем уравнения для:

проекции скорости  $v_x = v_0$ ,  $v_y = \frac{eU}{m_e d} t$ , координаты  $x = v_0 t$ ,  $y = \frac{eU}{2m_e d} t^2$ .

Время движения электрона в конденсаторе  $t_1$  находится из условия  $x = l$ . Следовательно,  $t_1 = \frac{l}{v_0}$ . Отклонение электрона  $y_1$  равно его координате в момент времени  $t_1$ . Итак,

$$y_1 = \frac{eUl^2}{2m_e v_0^2 d}.$$

б) Кинетическая энергия электрона  $W_k = \frac{m_e}{2} (v_x^2 + v_y^2)$ . В момент  $t_1$  она равна:

$$W_k = \frac{m_e}{2} \left[ v_0^2 + \left( \frac{eUl}{m_e v_0 d} \right)^2 \right].$$

в) Как видно из рисунка,  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v_y}{v_x}$ . В момент  $t_1$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{eUl}{m_e v_0^2 d}.$$

Если начальная скорость частицы образует произвольный угол с вектором напряженности  $\vec{E}$  однородного электрического поля, то она будет двигаться по параболической траектории. Так же движется тело, брошенное под углом  $\alpha$  к горизонту, в однородном гравитационном поле (в данной задаче траектория электрона – это часть параболы с вершиной в начале координат  $O$ ).

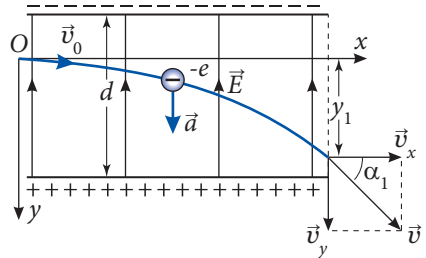


Рис. 4.46

### ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. При каких условиях траектория заряженной частицы в однородном электрическом поле является прямой линией?
2. Заряженная частица, двигаясь из состояния покоя вдоль линии напряженности однородного электрического поля между двумя точками с разностью потенциалов  $U_0$ , при-

обретает скорость  $v_0$ . При какой ускоряющей разности потенциалов частица приобретет скорость  $2v_0$ ?

3. Два положительных иона, имея одинаковый заряд, но различные массы, влетают в однородное электрическое поле. Начальные скорости ионов пренебрежимо малы и направлены вдоль линий напряженности поля. Сравните кинетические энергии и скорости ионов, если в поле они проходят одинаковый путь.
4. Заряженная частица попадает в заряженный плоский конденсатор со скоростью, параллельной пластинам. Как зависит от величины начальной скорости отклонение частицы на выходе из конденсатора от первоначального направления? Аргументируйте ответ.
5. Протон попадает в пространство между пластинами плоского конденсатора через отверстие в отрицательно заряженной пластине со скоростью, перпендикулярной пластине. Напряженность электрического поля между пластинами равна  $3 \cdot 10^4$  В/м, расстояние – 2 см. Определите:
  - а) минимальную скорость протона, необходимую для достижения положительно заряженной пластины;
  - б) минимальное расстояние от протона до положительно заряженной пластины, если скорость, с которой протон попадает в конденсатор, вдвое меньше найденной в пункте а).
6. Какой путь должен пройти протон в направлении линий напряженности электрического поля, чтобы его скорость увеличилась от  $5 \cdot 10^5$  м/с до  $6 \cdot 10^5$  м/с, если напряженность электрического поля равна  $4 \cdot 10^4$  В/м? Чему бы стала равной скорость протона, если с начальной скоростью  $5 \cdot 10^5$  м/с он прошел бы путь, найденный выше, в направлении, противоположном вектору напряженности электрического поля?
7. Электрон влетает в плоский конденсатор посередине между пластинами со скоростью, параллельной им. Длина пластин в направлении начальной скорости электрона равна 10 см, расстояние между ними – 4 мм. При какой минимальной начальной скорости электрон может вылететь из конденсатора, если напряженность электрического поля между пластинами равна  $2 \cdot 10^3$  В/м?



# ТЕСТЫ ДЛЯ ИТОГОВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

## РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:		
	а) Тело, которое ... электронов, заряжено положительно.		1 б.
	б) Заряд любого заряженного тела равен ... элементарных электрических зарядов.		1 б.
	в) Диэлектрическая проницаемость диэлектрика показывает, во сколько раз напряженность электрического поля в диэлектрике ..., чем в вакууме.		1 б.
2	Покажите (с помощью стрелок) соответствие между следующими физическими величинами и их единицами:		
	электрический заряд	• Дж/Кл	1 б.
	напряженность электрического поля	• Кл	1 б.
	разность потенциалов	• Кл/м	1 б.
	электроемкость	• В/м • Кл/В	1 б.
3	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно:		
	а) Электрический потенциал является энергетической характеристикой электрического поля.	<input type="checkbox"/>	1 б.
	б) Работа, совершаемая электростатическим полем при перемещении в нем точечного электрического заряда, зависит от его начального и конечного положений, а также от формы траектории между этими положениями.	<input type="checkbox"/>	1 б.
	в) Электроемкость батареи конденсаторов, соединенных последовательно, меньше емкости каждого из конденсаторов соединения.	<input type="checkbox"/>	1 б.
	Задания 4 и 5 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).		
4	Напряженность электростатического поля внутри проводника равна нулю, так как тангенциальная составляющая напряженности электрического поля равна нулю для точек на поверхности проводника.		
	Ответ:		3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .		

5	При увеличении расстояния между обкладками конденсатора, подключенного к источнику постоянного электрического напряжения, его заряд увеличивается, так как емкость конденсатора равна отношению его электрического заряда к разности потенциалов между обкладками.	
	Ответ:	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <i>причинно-следственная</i> связь – <input type="checkbox"/> .	
6	Электрические заряды $+2$ нКл и $-4$ нКл находятся на расстоянии $24$ см друг от друга. Определите:	
	а) напряженность электрического поля в точке, расположенной посередине отрезка, соединяющего заряды;	3 б.
	б) электрическую силу, действующую на заряд $4$ мкКл, внесенный в эту точку поля.	2 б.
7	Два одинаковых шара, несущие заряды $q_1 = +0,6$ мкКл и $q_2 = -0,2$ мкКл, находятся на расстоянии $d = 30$ см друг от друга.	
	а) Найдите на отрезке, соединяющем заряды, положение точки, в которой потенциал равен нулю.	3 б.
	б) Шары приведены в контакт, а затем разведены до первоначального расстояния. Вычислите электрический потенциал в точке, лежащей посередине отрезка, соединяющего шары.	3 б.
8	Плоский конденсатор подключен к источнику электрического напряжения $36$ В. Емкость конденсатора равна $7,2$ нФ, между его пластинами находится стеклянная пластина ( $\epsilon = 6,5$ ), толщина которой равна расстоянию между ними. Вычислите:	
	а) электрический заряд конденсатора;	1 б.
	б) величину его заряда при удалении из пространства между пластинами половины стеклянной пластины;	3 б.
	в) изменение энергии конденсатора при удалении половины стеклянной пластины.	3 б.

## ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:			
	а) Тело, которое ... электроны, заряжено отрицательно.			1 б.
	б) Самый маленький электрический заряд, существующий в природе в свободном состоянии, называется ...			1 б.
	в) Внутри проводника, находящегося в электростатическом поле, напряженность электрического поля ...			1 б.
2	Покажите (с помощью стрелок) соответствие между следующими физическими величинами и их единицами:			
	электрический заряд	•	• Ф	1 б.
	напряженность электрического поля	•	• В	1 б.
	разность потенциалов	•	• В/Кл	1 б.
	электроемкость	•	• Н/Кл	1 б.
		• Кл		
3	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно:			
	а) Напряженность электрического поля в данной точке равна произведению силы, действующей на точечный заряд, находящийся в этой точке, на величину заряда.	<input type="checkbox"/>		1 б.
	б) При внесении диэлектрика между двумя противоположно заряженными пластинами он поляризуется, на его поверхностях появляются связанные электрические заряды, знак которых противоположен знаку зарядов ближних пластин.	<input type="checkbox"/>		1 б.
	в) При увеличении расстояния между пластинами плоского конденсатора его электроемкость увеличивается.	<input type="checkbox"/>		1 б.
	Задания 4 и 5 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).			
4	Линии напряженности электростатического поля не пересекаются, так как линии напряженности однородного электрического поля параллельны и эквидистантны.			
	Ответ:			3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .			
5	Работа, совершаемая при перемещении точечного электрического заряда по поверхности проводника, равна нулю, так как электрический потенциал одинаков во всех точках проводника.			

	<b>Ответ:</b>	3 б.
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <i>причинно-следственная</i> связь – <input type="checkbox"/> .	
<b>6</b>	<b>Сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов <math>q_1 = 6</math> мкКл и <math>q_2 = 5</math> мкКл равна 12 Н. Определите:</b>	
	<b>а)</b> расстояние между зарядами;	2 б.
	<b>б)</b> напряженность электрического поля, создаваемого зарядом $q_1$ в точке, где находится заряд $q_2$ .	2 б.
<b>7</b>	<b>При перемещении точечного электрического заряда 4 мкКл из одной точки электростатического поля в другую совершена работа, равная 1,4 мДж. Зная, что электрический потенциал в начальной точке равен 50 В, определите:</b>	
	<b>а)</b> электрический потенциал в конечном положении точечного заряда;	3 б.
	<b>б)</b> потенциальную энергию точечного заряда в его конечном положении.	3 б.
<b>8</b>	<b>Плоский воздушный конденсатор, емкость которого равна 0,8 мкФ, заряжен от источника электрического напряжения 55 В, а затем отключен от него. Вычислите:</b>	
	<b>а)</b> электрический заряд конденсатора;	2 б.
	<b>б)</b> электрическое напряжение между обкладками при полном заполнении пространства между ними парафином ( $\epsilon = 2,2$ ).	3 б.

# ЭЛЕКТРОКИНЕТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

## 5.1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

### а. Постоянный электрический ток. Сила тока

После изучения физики в VIII классе вам известно, что **электрический ток** – это упорядоченное (направленное) движение частиц – носителей электрических зарядов.

Условились принимать за **направление электрического тока направление движения положительных электрических зарядов в проводнике**. Если же электрический заряд частиц отрицателен, то направление тока противоположно движению частиц.

Электрический ток в проводнике проявляется в переносе зарядов через его поперечное сечение. Чтобы можно было сравнить или охарактеризовать токи, введена **скалярная величина – сила электрического тока  $I$** .

Обозначим через  $\Delta q$  электрический заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $\Delta t$ . Согласно определению, сила тока:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (5.1)$$

**Сила тока в проводнике равна отношению электрического заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника, к интервалу времени его прохождения.**


В общем случае со временем может изменяться как сила тока, так и его направление. В данной главе будет изучаться электрического ток, не изменяющийся по величине и направлению.

**Электрический ток, не меняющийся с течением времени по величине и направлению, называется постоянным ( $I = \text{const}$ ).**

В случае постоянного тока выражение (5.1) может быть записано для любого интервала времени, при этом отношение останется тем же:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (5.2)$$

где  $q$  – электрический заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за время  $t$ .

Единица силы тока называется **ампер** (А) и является одной из **основных единиц** в СИ. Силу тока измеряют **амперметром**, его условное обозначение на схемах: .

Так как весь электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника, должен проходить и через амперметр, то он включается в цепь последовательно.

Из (5.2) выразим **электрический заряд (количество электричества)**  $q$ , переносимый по проводнику, за время  $t$ :

$$q = It. \quad (5.3)$$

Из этого выражения определим единицу электрического заряда – **кулон** (Кл):

$$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}.$$

**Кулон** – это электрический заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника при силе постоянного тока 1 А.

В цепях постоянного тока сила тока не изменяется со временем, то есть электрический заряд не может накапливаться на каком-либо участке цепи, что повлияло бы на величину силы тока. Применяв закон сохранения электрического заряда к электрическим цепям, приходим к выводу:

**В электрической цепи постоянного тока без ответвлений в любом поперечном сечении проводника значение силы тока одинаково.**

Отсюда следует, что амперметр, включенный в любом месте цепи без ответвлений, показывает одно и то же значение силы тока.

Пусть к некоторой точке А цепи подключено три или больше проводников (рис. 5.1). Такая точка называется **узлом**. Применяя закон сохранения электрического заряда к узлу на рисунке, получим:

$$I_1 = I_2 + I_3. \quad (5.4)$$

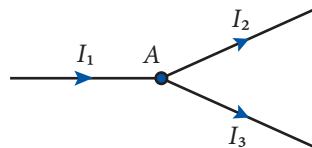


Рис. 5.1

Результат (5.4) был установлен для узла, в котором соединены три проводника. Для узлов, в которых соединено больше проводников, соотношение (5.4) заменяется другим, содержащим соответствующее количество слагаемых. Итак, **сумма токов, входящих в узел в цепи постоянного тока, равна сумме токов, выходящих из этого узла.**

Этот вывод известен под названием **первого правила Кирхгофа** и широко применяется при расчетах электрических цепей.


## 6. Условия существования постоянного электрического тока. Электродвижущая сила

Электрический ток возможен только в телах, где носители электрического заряда могут перемещаться во всем их объеме, то есть на расстояния во много раз большие

размеров атома. Такие носители называют **свободными**, а тела – **проводниками**. **Наличие свободных электрических зарядов является одним из условий существования электрического тока.**

Например, свободные электрические заряды в металлах – **свободные электроны** (см. п. 5.5), в газах – **положительные, отрицательные ионы и электроны**, в электролитах – **положительные и отрицательные ионы**. В данной главе мы рассмотрим подробно электрический ток в металлах и в различных средах.

Свободные электроны могут двигаться направленно (в отличие от хаотичного, теплового движения) только в случае действия на них сил, сообщающих им ускоренное движение в одном направлении. Это могут быть силы, действующие со стороны электрического поля. Существование внутри проводника электрического поля означает, что между его концами есть разность потенциалов (см. формулу 4.22). Итак, **электрический ток возникает и существует в проводнике, если только между его концами имеется разность потенциалов (электрическое напряжение).**

Электрическое напряжение измеряется вольтметром; условное обозначение на схемах: .

Его зажимы подключаются к концам проводника, между которыми и измеряется напряжение.

Выше упоминалось, что за направление тока принято направление упорядоченного движения положительных зарядов. Они движутся в направлении электрического поля, т. е. в сторону убывания электрического потенциала. Это означает, что **электрический ток направлен от области с высоким потенциалом в область с низким потенциалом.**

Чтобы лучше понять, как возникает постоянный ток, воспользуемся аналогией из гидродинамики. В сосуде *A* и трубе *T* находится жидкость (рис. 5.2) Если открыть кран *R*, то жидкость из сосуда *A* вытечет в сосуд *B* и движение жидкости прекратится. Жидкость течет непрерывно лишь в замкнутом контуре, где обязательно есть насос *P* (рис. 5.3). Под действием силы тяжести жидкость течет по трубе *T* сверху вниз. Лопатки насоса *P* давят на жидкость и она поднимается по трубе *T'* в направлении, противоположном действию силы тяжести. Так обеспечивается постоянное течение жидкости в системе из труб.

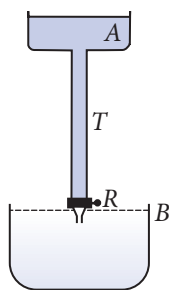


Рис. 5.2

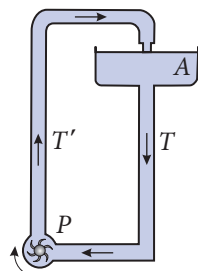


Рис. 5.3

В электрической цепи носители положительного заряда перемещаются от точек с высоким потенциалом к точкам с низким потенциалом. Электрический ток может быть постоянным только в замкнутой цепи, содержащей «электрический насос», перемещающий положительные заряды из точек с низким потенциалом в точки с высоким потенциалом, то есть в направлении, противоположном действию электростатических (кулоновских) сил. В этом случае действующие на заряды силы называют **сторонними**. Их природа отличается от электростатической, они совершают работу по перемещению электрических зарядов за счет неэлектростатических видов энергии (химической, механической и т. д.).

Элемент электрической цепи, в котором действуют сторонние силы, называют **источником тока**.

На схемах его изображают знаком  $\text{---}||\text{---}$  или  $\text{---}\bigcirc\text{---}$ .

На рисунке 5.4 показана простая электрическая цепь. Во внешнем участке цепи (без источника тока) положительные электрические заряды перемещаются под действием электростатических сил от положительного полюса источника тока к отрицательному. **Внутри источника тока положительные заряды перемещаются в сторону действия сторонних сил – от отрицательного полюса к положительному, в направлении, противоположном действию электростатических сил.**

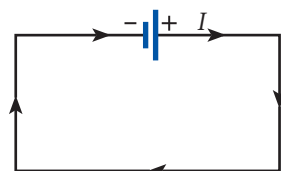


Рис. 5.4

Перемещая электрические заряды, сторонние силы совершают работу  $A_{\text{ст}}$ . В случае перемещения большего заряда  $q$  возрастет и совершенная работа:  $A_{\text{ст}} \sim q$ . Отношение  $A_{\text{ст}}/q$  не зависит от величины переносимого по цепи электрического заряда, является величиной, характеризующей источник тока, и называется **электродвижущей силой**<sup>1</sup> (ЭДС):

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (5.5)$$

**Электродвижущая сила источника тока равна отношению работы сторонних сил по перемещению электрического заряда по цепи к величине этого заряда.**

Единица электродвижущей силы

$$[\mathcal{E}] = \frac{[A_{\text{ст}}]}{[q]} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В}$$

совпадает с единицей и напряжения, и разности потенциалов.

Электродвижущая сила – важная характеристика источника тока, она указывается, к примеру, на корпусе гальванического элемента, батареи: 1,5 В, 4,5 В и т. д.

**Итак, постоянный электрический ток может существовать, если во всех элементах цепи есть свободные электрические заряды, электрическая цепь замкнута и содержит один или несколько источников тока.**

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Что называют электрическим током? Что принимают за направление тока?
2. Дайте определение силы тока.
3. Какое условие должно выполняться для токов в проводниках, соединенных в одном узле?
4. Какие носители электрических зарядов называют свободными?
5. Какие силы перемещают электрические заряды по цепи вне источника тока? Внутри источника?
6. Дайте определение электродвижущей силы источника тока.
7. Какой электрический заряд прошел через поперечное сечение проводника за 6 с при силе тока в нем 1,25 А?

<sup>1</sup> У неудачных терминов «сила тока», «электродвижущая сила» нет ничего общего с силой, измеряемой в ньютонах. Термины были введены давно и сохраняются по традиции.



8. Через поперечное сечение проводника за 8 с проходит  $6 \cdot 10^{19}$  электронов. Чему равна сила тока в проводнике?
9. Какой величины электрический заряд пройдет через поперечное сечение проводника за 12 с, если за 7 с при таком же токе через поперечное сечение проводника перенесен заряд 10,5 Кл? Чему равна сила тока в проводнике?
10. Три проводника соединены в один узел. По одному проводнику к узлу подведен ток в 1,2 А, по второму проводнику из узла выходит ток в 1,7 А. Чему равна сила тока в третьем проводнике? К узлу или от узла направлен этот ток?
11. На рисунке 5.5 представлены графики зависимости силы тока, проходящего через проводники, от времени. Предложите графический метод, позволяющий определить электрический заряд, переносимый через проводник за некоторый промежуток времени. Найдите для обоих случаев величины зарядов, переносимых через проводники за промежуток времени от 0 до 5 с.

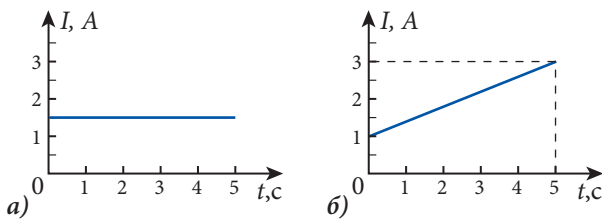


Рис. 5.5

## 5.2 ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### а. Закон Ома для однородного участка цепи. Электрическое сопротивление

Кратко повторим материал, изученный по этой теме в гимназии.

Рассмотрим участок электрической цепи, на котором не действуют сторонние силы, то есть участок не содержит источников тока. Такой участок называют **однородным**. В соответствии с изложенным выше сила тока  $I$  не равна нулю, если к концам участка приложено электрическое напряжение  $U = \varphi_1 - \varphi_2$ . Можно сказать, что сила тока  $I$  зависит от напряжения  $U$ .

В 1826 году Георг Ом установил опытным путем, что:

**сила тока в проводнике прямо пропорциональна приложенному к его концам напряжению:  $I \sim U$ .**

Этот результат известен как **закон Ома для однородного участка цепи**. Перейдем к равенству, введя коэффициент пропорциональности  $1/R$ . Получим:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}. \quad (5.6)$$

Величина  $R$ , характеристика проводника, называется **электрическим сопротивлением**.

Формула (5.6) – математическое выражение закона Ома для однородного участка цепи. Из (5.6) электрическое сопротивление

$$R = \frac{U}{I}. \quad (5.7)$$

Единица сопротивления называется **Ом** и обозначается Ом (или  $\Omega$ ).

Из (5.7) видно, что **1 Ом – это сопротивление проводника, через который проходит ток в 1А при напряжении на его концах 1В.**

Из этой же формулы (5.7) установим связь между соответствующими единицами:

$$[R] = \frac{[U]}{[I]} = \frac{В}{А} = \text{Ом}.$$

Сравнивая сопротивления цилиндрических проводников постоянного поперечного сечения из одинаковых материалов, Ом установил, что они равны в случае равенства отношений длины проводника  $l$  к его поперечному сечению  $S$ . Сопротивление проводников постоянного поперечного сечения увеличивалось с увеличением их длины. Ом пришел к выводу, что

$$R \sim \frac{l}{S}.$$


Перейдем к равенству, введя коэффициент пропорциональности  $\rho$ , зависящий от природы вещества, из которого изготовлен проводник, от температуры. Получим:

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (5.8)$$

Величина  $\rho$ , называемая **удельным сопротивлением проводника**, – характеристика вещества, ее единица

$$[\rho] = \frac{[R] \cdot [S]}{[l]} = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Из этого следует, что удельным сопротивлением  $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  обладает проводник цилиндрической формы с поперечным сечением  $S = 1 \text{ м}^2$ , длиной 1 м, сопротивление которого равно 1 Ом.

Элемент электрической цепи, имеющий определенное электрическое сопротивление, называется **резистором**. На схемах изображается значком . Около значка пишут букву  $R$ , часто с индексом, если в электрической цепи есть несколько резисторов. Сопротивлением соединительных проводов из-за их малости в сравнении с резисторами пренебрегают.

В электрических цепях встречаются различные соединения резисторов. Зачастую необходимо группу резисторов заменить одним, имеющим такое же сопротивление. Оно называется **эквивалентным сопротивлением**.

**ГЕОРГ СИМОН ОМ**

(1789 – 1854), НЕМЕЦКИЙ ФИЗИК



Провел важные исследования в области электричества. Ввел понятия электрического сопротивления проводника, электродвижущей силы источника тока. В 1826 г. установил связь между силой тока, электрическим напряжением и сопротивлением проводника, называемую законом Ома. Изучил зависимость сопротивления металлического проводника от температуры. Ом провел аналогии между процессами распространения «электричества» и «теплоты», между электрическим током и течением жидкости в трубах. Исследовал звуковые явления. Ом установил, что звуковой сигнал состоит из основного гармонического колебания (тона) и кратных ему добавочных колебаний (обертонов). Позже этот результат назвали акустическим законом Ома. В честь ученого названа единица электрического сопротивления.

Рассмотрим конкретные случаи соединения резисторов.

На рисунке 5.6 показано **последовательное соединение** резисторов с сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3$ . Это соединение не содержит ответвлений, резисторы «следуют один за другим», начало

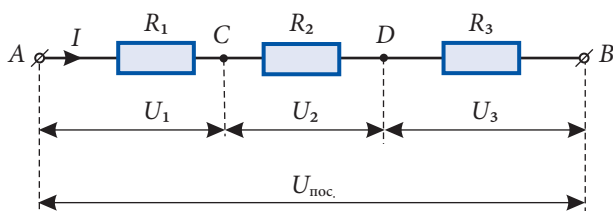


Рис. 5.6

каждого резистора соединяется с концом предыдущего. Сила тока  $I$  одинакова во всех резисторах:  $I_{\text{пoc.}} = I_1 = I_2 = I_3$ .

Учитывая, что напряжение на концах группы резисторов, соединенных последовательно, равно сумме напряжений на каждом резисторе ( $U_{\text{пoc.}} = U_1 + U_2 + U_3$ ), и применяя закон Ома, найдем величину эквивалентного сопротивления:

$$R_{\text{пoc.}} = R_1 + R_2 + R_3. \quad (5.9)$$

**Эквивалентное сопротивление соединенных последовательно резисторов равно сумме их сопротивлений.**

На рисунке 5.7 показано **параллельное соединение** резисторов. В этом случае выводы резисторов соединены между собой в двух узлах. Электрическое напряжение между узлами  $A$  и  $B$ , приложенное ко всей группе параллельно соединенных резисторов, совпадает с напряжением на каждом резисторе:  $U_{\text{пар.}} = U_1 = U_2 = U_3$ . Согласно установленной ранее связи между токами (формула (5.4)) сила тока  $I_{\text{пар.}}$ , входящего в узел  $A$ , равна сумме токов, выходящих из узла, то есть  $I_{\text{пар.}} = I_1 + I_2 + I_3$ . Применив закон Ома, получим формулу, позволяющую найти эквивалентное сопротивление  $R_{\text{пар.}}$ :

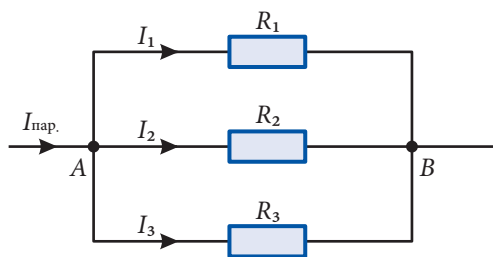


Рис. 5.7

$$\frac{1}{R_{\text{пар.}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (5.10)$$

**Величина, обратная эквивалентному сопротивлению параллельно соединенных резисторов, равна сумме величин, обратных сопротивлениям каждого из резисторов.**

Из формул (5.9) и (5.10) видно, что эквивалентное сопротивление при последовательном соединении больше наибольшего из сопротивлений резисторов, образующих цепь, а в случае параллельного соединения эквивалентное сопротивление меньше наименьшего из сопротивлений резисторов, входящих в разветвленный участок цепи.

Возможность получения различных сопротивлений, по-разному подключая резисторы, применяется в **реостате** – устройстве с изменяемым сопротивлением. Рассмотрим устройство **ползункового реостата** (рис. 5.8, а). Он представляет собой обмотку из проволоки с большим удельным сопротивлением (из сплавов, например, никелина, фехрала), намотанную в один слой на цилиндр из термостойкого изолятора,

например из керамики. Витки обмотки изолированы друг от друга тонким слоем окислы. Концы проволоки соединены с зажимами *A* и *B*. Над обмоткой параллельно ее оси расположен металлический стержень, на котором укреплен подвижный

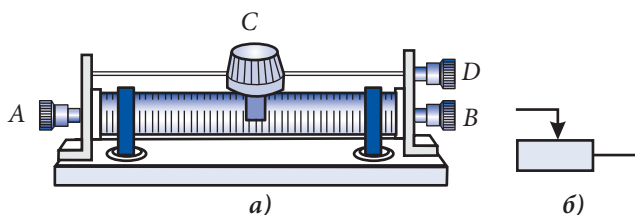


Рис. 5.8

ползунком *C*, касающийся витков обмотки. На конце стержня есть третий зажим *D*. У некоторых реостатов один из зажимов – *A* или *B* отсутствует. Реостат подключается в цепь с помощью зажима *D* и одного из зажимов – *A* или *B*. Электрический ток проходит от зажима *D* по стержню к ползунку *C*, затем по виткам обмотки между ползунком и зажимом, подсоединенным к цепи – *A* или *B*.

При перемещении ползунка число последовательно соединенных витков обмотки увеличивается или уменьшается. Соответственно изменяется и сопротивление реостата. Условное обозначение реостата в электрических схемах дано на рисунке 5.8, б.

Ползунковый реостат позволяет плавно изменять сопротивление (на величину сопротивления одного витка).

## 6. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля

Вызвав упорядоченное движение свободных электрических зарядов в проводнике электрическое поле совершает работу, ее принято называть **работой электрического тока**. При перемещении электрического заряда  $q$  по участку цепи, находящегося под напряжением  $U$ , работа электрического тока в соответствии с формулой (4.19) равна  $A = qU$ . За время  $t$  при силе тока  $I$  через проводник пройдет заряд  $q = It$  (см. формулу 5.3). Тогда для работы электрического тока получим выражение

$$A = IUt. \quad (5.11)$$

Применяя закон Ома, можно получить и другие формулы для совершенной током работы:

$$A = I^2Rt \quad \text{или} \quad A = \frac{U^2}{R} t. \quad (5.12)$$

Отметим, что выражение (5.11) применяется в случае преобразования энергии в любую другую форму – механическую, химическую, внутреннюю. Выражения (5.12) верны только в случае, если потребитель энергии – резистор, то есть электроэнергия превращается во внутреннюю и выделяется в виде тепла.

Развиваемую электрическим током мощность, численно равную работе, совершаемой в единицу времени, находят по формулам:

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2R = \frac{U^2}{R}. \quad (5.13)$$

При решении задач используют для расчетов наиболее подходящие из формул (5.11) – (5.13).

Например, в соединенных последовательно резисторах с сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  сила тока одинакова. Из формулы для мощности  $P = I^2R$  следует:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_1}{R_2} . \quad (5.14)$$

В случае последовательного соединения резисторов отношение развиваемых электрическим током мощностей в разных участках цепи равно отношению сопротивлений этих участков. Развиваемая мощность больше на резисторе с бóльшим сопротивлением.

Если резисторы соединены параллельно, то напряжения на них одинаковы. С помощью выражения  $P = \frac{U^2}{R}$ , для отношения развиваемых мощностей получим:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{R_2}{R_1} . \quad (5.15)$$

В случае параллельного соединения резисторов отношение развиваемых мощностей в разных участках цепи равно обратному отношению сопротивлений этих участков. Развиваемая мощность больше на резисторе с меньшим сопротивлением.

Формулы (5.11) и (5.13) позволяют выразить единицы работы (Дж) и мощности (Вт) через единицы электрических величин:

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} \quad \text{и} \quad 1 \text{ Вт} = 1 \text{ А} \cdot \text{В}.$$

В электротехнике используется специальная единица измерения для энергии (работы) – **киловатт-час** (кВт · ч). Она равна работе, совершенной электрическим током за один час при мощности один киловатт. Выразим один киловатт-час в джоулях:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 10^3 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 3,6 \text{ МДж}.$$

Если электрическая энергия не превращается в химическую энергию (например, при зарядке аккумуляторов) или в механическую (например, в электродвигателях), то она полностью превращается во внутреннюю энергию потребителя (например, в электроплите, в лампе накаливания и т.д.).

Рассмотрим подробнее последнее превращение. Электрическое поле в проводнике ускоряет носители зарядов, их кинетическая энергия растет. В результате столкновений с положительными ионами в узлах кристаллической решетки металла носители заряда отдают часть своей кинетической энергии. Кинетическая энергия ионов растет, растет интенсивность теплового движения, растет, соответственно, и температура проводника, выделяется тепло. Согласно закону сохранения и превращения энергии количество выделившейся теплоты равно работе электрического тока:  $Q = A$ . В соответствии с выражением (5.12) выделившееся количество теплоты

$$Q = I^2 R t . \quad (5.16)$$

**Выделившееся в проводнике (резисторе) количество теплоты равно произведению квадрата силы тока, его сопротивления и продолжительности прохождения тока по нему.**

Этот вывод известен как **закон Джоуля**. Английский физик Джоуль открыл его в 1841 году. Независимо от Джоуля двумя годами позже этот закон опубликовал российский ученый Ленц, поэтому закон известен и как закон Джоуля–Ленца.

Тепловое действие электрического тока имеет бесчисленные применения в повседневной жизни и технике. Действие электробытовых приборов (лампочка накаливания, электроплитка, электрический кипятильник, утюг, электропечь и многие другие) основано на явлении выделения тепла в проводниках, изготовленных из материалов с большим удельным сопротивлением и высокой температурой плавления (обычно нихром или фехраль).

В технике тепловое действие электрического тока используется для контактной сварки металлов с большим удельным сопротивлением (никель, молибден, тантал и др.).

Для защиты проводников и источников тока в различных цепях используются плавкие предохранители. Это тонкие проводники из легкоплавких материалов (свинец, медь и др.), которые плавятся, если сила тока в данной цепи превышает некоторое максимальное значение.

### в. Закон Ома для полной цепи

Рассмотрим простую электрическую цепь, состоящую из источника тока и подключенного к его полюсам резистора (рис. 5.9). Резистор сопротивлением  $R$  представляет собой внешний участок цепи, поэтому сопротивление  $R$  называют **внешним сопротивлением**. Источник тока – внутренний участок цепи – характеризуется не только электродвижущей силой, но и электрическим сопротивлением, оно обозначается обычно буквой  $r$  и называется **внутренним сопротивлением**. Источник тока и резистор соединены последовательно, поэтому полное сопротивление цепи  $R_{\text{пол.}} = R + r$ .

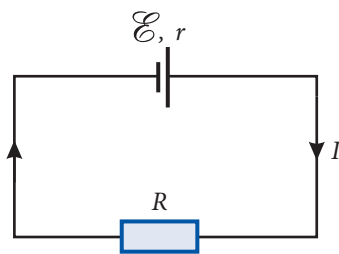


Рис. 5.9

Пусть сила тока в цепи равна  $I$ . За промежуток времени  $t$  по цепи переносится электрический заряд  $q = It$  (5.3). Сторонние силы в источнике тока совершают работу, равную в соответствии с (5.5):

$$A_{\text{ст.}} = q \mathcal{E} = It \cdot \mathcal{E}. \quad (5.17)$$

В рассматриваемой цепи эта работа приводит только к росту внутренней энергии ее элементов, а значит и к выделению количества теплоты  $Q$ . Согласно закону Джоуля,

$$Q = I^2 R_{\text{пол.}} t = I^2 (R + r) t.$$

Приравняв  $A_{\text{ст.}} = Q$  (закон сохранения и превращения энергии), после упрощения получим:

$$\mathcal{E} = I (R + r). \quad (5.18)$$

Сила тока в цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}. \quad (5.19)$$

Эта формула представляет собой **закон Ома для полной цепи**:

Сила тока в полной цепи равна отношению электродвижущей силы источника тока к ее полному сопротивлению.

Согласно закону Ома для участка цепи (5.6) произведение  $IR = U$  – это напряжение на зажимах источника тока, называемое **падением напряжения во внешней цепи**. Соответственно произведение  $Ir = u$  – **падение напряжения внутри источника тока**. Выражение (5.18) примет вид:

$$\mathcal{E} = U + u. \quad (5.20)$$

**Сумма падений напряжений во внешней цепи и внутри источника тока равна электродвижущей силе источника тока.**

Если к полюсам источника тока подключать резисторы с разным сопротивлением, сила тока в цепи будет изменяться, будут изменяться и падения напряжения  $U$  и  $u$ , но их сумма останется неизменной. В этом можно убедиться на опыте, схема которого показана на рисунке 5.10. Источник тока состоит из сосуда с раствором серной кислоты и двух электродов: одного из меди, другого из цинка. К зажимам (полюсам) источника тока подсоединены резистор сопротивлением  $R$  и вольтметр  $V_1$ , измеряющий падение напряжения  $U$  во внешней цепи. С помощью двух электродов из графита (они не вступают в реакцию с раствором), соединенных с вольтметром  $V_2$ , измеряется падение напряжения  $u$  внутри источника тока. Подключая различные резисторы, можно убедиться в справедливости соотношения (5.20).

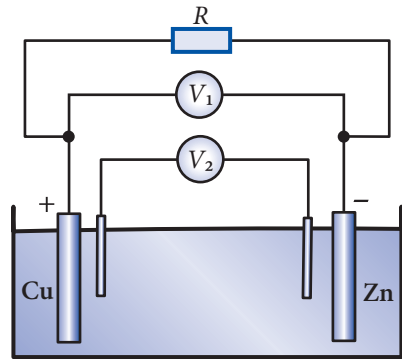


Рис. 5.10

Подключая различные резисторы, можно убедиться в справедливости соотношения (5.20).

Из выражения (5.19) видно, что сила тока в замкнутой цепи зависит от двух величин, характеризующих источник тока: ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутреннего сопротивления  $r$ , а также сопротивления  $R$  внешнего участка цепи. Если характеристики источника тока неизменны, то сила тока  $I$  зависит только от сопротивления  $R$ .

Из (5.19) видно, что увеличение сопротивления  $R$  сопровождается уменьшением силы тока. Соответственно уменьшается падение напряжения  $u$  внутри источника тока, а напряжение  $U$  во внешней цепи приближается к значению электродвижущей силы. Этот результат может быть получен и другим путем. Из выражения (5.20), в которое подставим  $u = Ir$ , имеем:

$$U = \mathcal{E} - Ir, \quad (5.21)$$

откуда следует, что если  $I \rightarrow 0$ , то  $U \rightarrow \mathcal{E}$ .

Следовательно, электродвижущую силу источника тока можно измерить, подключив к его зажимам вольтметр, сопротивление которого много больше внутреннего сопротивления источника тока ( $R_V \gg r$ ).

Наоборот, при уменьшении сопротивления  $R$  сила тока  $I$  растет. Случай, когда внешнее сопротивление становится практически равным нулю ( $R = 0$ ) называется **коротким замыканием**. Из (5.19) следует, что ток короткого замыкания:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (5.22)$$

В источниках тока с малым внутренним сопротивлением ток короткого замыкания достигает больших значений. Например, в аккумуляторах – десятков и даже сотен ампер. В таком случае аккумулятор может выйти из строя. Поэтому **в электрических цепях необходима защита от короткого замыкания**. Для защиты в электрическую цепь последовательно включают предохранители. Простейший плавкий предохранитель содержит проводник, легко плавящийся, если сила тока превысит допустимую величину. Так размыкается электрическая цепь.

С учетом закона Ома (5.19) для мощности, развиваемой источником тока во внешней цепи, получим:

$$P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (5.23)$$

Из (5.23) видно, что мощность  $P$  уменьшается, когда внешнее сопротивление  $R$  становится очень малым ( $R \rightarrow 0$ ) и когда оно становится очень большим ( $R \rightarrow \infty$ ). Следовательно, есть такое значение внешнего сопротивления  $R$ , при котором развиваемая источником тока во внешней цепи мощность имеет наибольшее значение. Чтобы его найти используем очевидное равенство:

$$(R + r)^2 - (R - r)^2 = 4 Rr,$$

откуда получим:

$$R = \frac{1}{4r} [(R + r)^2 - (R - r)^2].$$

Подставив это выражение в числитель в формуле (5.23), получим:

$$P = \frac{\mathcal{E}^2}{4r} \left( 1 - \frac{(R - r)^2}{(R + r)^2} \right).$$

Очевидно, что мощность максимальна ( $P = P_{\max}$ ) для  $R = r$ .

Мощность, развиваемая источником тока во внешней цепи, максимальна, когда внешнее сопротивление цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока. В этом случае:

$$P_{\max} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}. \quad (5.24)$$

Часть развиваемой источником тока мощности выделяется внутри него в виде тепла и бесполезно теряется. С этой точки зрения электрическую цепь можно охарактеризовать **коэффициентом полезного действия** (КПД). Он равен отношению полезной мощности  $P_{\text{п.}} = I^2 R$ , развиваемой источником во внешней цепи, к полной мощности  $P_{\text{полн.}} = I^2 (R + r)$ , развиваемой во всей цепи. КПД равен:

$$\eta = \frac{P_{\text{п.}}}{P_{\text{полн.}}} = \frac{R}{R + r}. \quad (5.25)$$

Из (5.25) видно, что КПД электрической цепи растет с ростом сопротивления внешнего участка цепи почти до  $\eta = 1$  (100%), когда  $R \gg r$ . Напомним, что все эти рассуждения верны для цепи, в которой работа тока приводит только к выделению тепла.



**Дано:**

$$R_1 = R = 10 \text{ Ом,}$$

$$R_2 = 2R,$$

$$R_3 = 3R,$$

$$\mathcal{E} = 24 \text{ В,}$$

$$r = 0,4 R$$

$$I_{BC} - ?, I_{AB} - ?;$$

$$\frac{I_{AB}}{I_{BC}} - ?$$

В цепи на *рисунке 5.11* известны сопротивления  $R_1 = R = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2R$ ,  $R_3 = 3R$ . ЭДС источника тока  $\mathcal{E} = 24 \text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $r = 0,4 R$ . Каковы будут показания амперметра с ничтожно малым сопротивлением, когда он находится на участке цепи между точками 1)  $BC$ ; 2)  $AB$ ? Во сколько раз отличаются силы тока, регистрируемые амперметром в этих двух положениях?

**Решение**

Амперметр, включенный в цепи на участке  $BC$ , регистрирует ток, проходящий через резистор  $R_3$ , а на участке  $AB$  – ток, проходящий через резистор  $R_1$ . В узле  $B$  ток  $I_1$  разветвляется на токи  $I_2$  и  $I_3$  и согласно первому правилу Кирхгофа

$$I_1 = I_2 + I_3.$$

Напряжение на зажимах резисторов  $R_2$  и  $R_3$ , соединенных параллельно, одинаково. Согласно закону Ома для участка цепи это напряжение равно

$$I_2 R_2 = I_3 R_3.$$

Из этих двух уравнений для тока  $I_3 \equiv I_{BC}$  получаем

$$I_{BC} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} I_1.$$

Для определения тока  $I_1 \equiv I_{AB}$ , используем закон Ома для полной цепи:

$$I_{AB} = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{внеш.}} + r},$$

где  $R_{\text{внеш.}}$  – сопротивление внешнего участка цепи,  $r$  – внутреннее сопротивление источника. Поскольку резисторы  $R_2$  и  $R_3$  соединены параллельно, а  $R_1$  – последовательно с ними, то внешнее сопротивление равно:

$$R_{\text{внеш.}} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Подставляя  $R_{\text{внеш.}}$  в выражение для  $I_{AB}$ , а полученный результат  $I_{AB} = I_1$  – в формулу для  $I_{BC}$ , получим силы токов для двух рассматриваемых случаев:

$$I_{AB} = \frac{(R_2 + R_3)\mathcal{E}}{(R_2 + R_3)(R_1 + r) + R_2 R_3} = \frac{5\mathcal{E}}{13R} \approx 0,92A;$$

$$I_{BC} = \frac{R_2 \mathcal{E}}{(R_2 + R_3)(R_1 + r) + R_2 R_3} = \frac{2\mathcal{E}}{13R} \approx 0,37A.$$

Видно, что ток  $I_{AB}$  больше  $I_{BC}$ :

$$\frac{I_{AB}}{I_{BC}} = \frac{5\mathcal{E}}{13R} \cdot \frac{13R}{2\mathcal{E}} = 2,5.$$

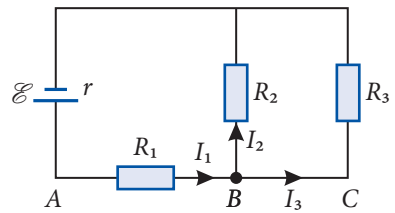


Рис. 5.11

**Дано:**

$$r = 1 \text{ Ом},$$

$$R = 6 \text{ Ом}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = ?$$

К источнику тока с внутренним сопротивлением  $r = 1 \text{ Ом}$  подсоединены две электроплитки с одинаковым сопротивлением  $R = 6 \text{ Ом}$ , одна из них – посредством ключа  $K$  (рис. 5.12). Определите, во сколько раз количество теплоты, выделяемое этими электроплитками после замыкания ключа  $K$ , больше, чем количество теплоты, выделяемое за такой же промежуток времени первой электроплиткой до замыкания ключа.

**Решение**

**1. Ключ  $K$  разомкнут.** В этом случае нагревается только одна плитка ( $I_2 = 0$ ) и выделяемая теплота, согласно закону Джоуля-Ленца (5.16)  $Q_1 = I_1^2 R t$ . Ток  $I_1$  равен полному току  $I_{\text{п}}$ , который вычисляется по закону Ома для полной цепи:

$$I_{\text{п}} = \frac{\mathcal{E}}{R + r}.$$

Таким образом, выделяемая теплота равна

$$Q_1 = \frac{\mathcal{E}^2 R t}{(R + r)^2}.$$

**2. Ключ  $K$  замкнут,** обе плитки нагреваются. Поскольку сопротивления плиток одинаковы, то и силы токов равны  $I_1 = I_2$  (см. рисунок 5.12). Согласно первому правилу Кирхгофа

$$I_{\text{п}} = I_1 + I_2 = 2I.$$

Полный ток  $I_{\text{п}}$  определяется из закона Ома:

$$I_{\text{п}} = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{п}} + r} = \frac{2\mathcal{E}}{R + 2r},$$

а сила тока, текущего через каждую плитку, равна

$$I = \frac{I_{\text{п}}}{2} = \frac{\mathcal{E}}{R + 2r}.$$

Количество теплоты  $Q_2$ , выделяемое в этом случае, равно сумме количеств теплоты  $Q_{21}$  и  $Q_{22}$ , выделяемых каждой из плиток за промежуток времени  $t$ :

$$Q_2 = Q_{21} + Q_{22} = 2I^2 R t = \frac{2\mathcal{E}^2 R t}{(R + 2r)^2}.$$

Взяв отношение  $Q_2/Q_1$ , ополучим, во сколько раз количество теплоты, выделяемое при нагревании обеих плиток, соединенных параллельно, больше выделяемого одной плиткой:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = 2 \left( \frac{R + r}{R + 2r} \right)^2; \frac{Q_2}{Q_1} \approx 1,53.$$

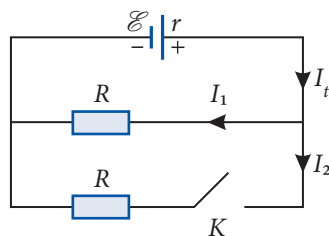


Рис. 5.12

### Пример решения задачи

3

**Дано:**

$$I = 2 \text{ A,}$$

$$I_{\text{к.з.}} = 10 \text{ A}$$

$\eta - ?$

В цепи, состоящей из генератора и реостата, течет ток  $I = 2 \text{ A}$ . Чему равен коэффициент полезного действия генератора тока в данном случае, если ток короткого замыкания  $I_{\text{к.з.}} = 10 \text{ A}$ ? Получите зависимость КПД генератора от силы тока в цепи и представьте ее графически.

### Решение

В соответствии с (5.25) коэффициент полезного действия генератора

$$\eta = \frac{P_{\text{пол.}}}{P_{\text{п}}}.$$

Полезная мощность  $P_{\text{пол.}}$  – это мощность, выделяемая во внешней части цепи, она равна разности между полной мощностью  $P_{\text{п}} = I\mathcal{E}$  и мощностью, выделяемой внутри генератора  $P_{\text{г}} = I^2r$ , то есть

$$P_{\text{пол.}} = I\mathcal{E} - I^2r,$$

где  $\mathcal{E}$  и  $r$  – это ЭДС и внутреннее сопротивление генератора.

Таким образом, для коэффициента полезного действия получаем:

$$\eta = \frac{I(\mathcal{E} - Ir)}{\mathcal{E}I} = 1 - \frac{r}{\mathcal{E}}I.$$

С учетом выражения (5.22) для силы тока короткого замыкания коэффициент полезного действия равен

$$\eta = 1 - \frac{I}{I_{\text{к.з.}}}; \quad \eta = 80\%.$$

Видно, что коэффициент полезного действия линейно зависит от силы тока (рис. 5.13). Изменяя реостатом внешнее сопротивление, мы изменим и силу тока. При его увеличении КПД генератора уменьшается и становится равным нулю, когда сила тока равна току короткого замыкания.

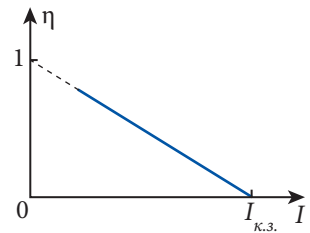


Рис. 5.13

### Пример решения задачи

4

**Дано:**

$$C = 50 \text{ мкФ,}$$

$$\mathcal{E} = 12 \text{ В,}$$

$$q = 480 \text{ мкКл,}$$

$$P = 10 \text{ Вт}$$

$r - ?$

СИ:

$$5 \cdot 10^{-5} \text{ Ф,}$$

$$4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$$

Ом

Резистор и конденсатор емкостью  $C = 50 \text{ мкФ}$  соединены параллельно и подключены к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$  (рис. 5.14). Определите внутреннее сопротивление источника, если известно, что заряд на обкладках конденсатора  $q = 480 \text{ мкКл}$ , а на резисторе выделяется мощность  $P = 10 \text{ Вт}$ .

### Решение

Выразим внутреннее сопротивление источника из закона Ома для полной цепи (5.19):

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I} - R = \frac{\mathcal{E} - U}{I},$$

где  $U$  – падение напряжения на резисторе  $R$ , равное напряжению на зажимах конденсатора:

$$U = \frac{q}{C}.$$

Мощность, выделяемая на резисторе  $R$ , выражается через силу тока

$$P = I^2 R = IU = \frac{Iq}{C},$$

откуда  $I = \frac{PC}{q}$ .

Внося выражения для напряжения  $U$  и силы тока  $I$  в соотношение для внутреннего сопротивления, получаем:

$$r = \frac{(\mathcal{E}C - q)q}{PC^2}; \quad r \approx 2,3 \text{ Ом.}$$

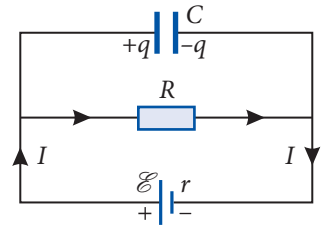


Рис. 5.14

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

- Какой участок цепи называется однородным?
- Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи.
- На рисунке 5.15 показаны графики зависимости силы тока на участках цепи с разными сопротивлениями ( $R_1$  и  $R_2$ ) от напряжения. Какое из сопротивлений меньше?
- Как надо соединить два резистора, чтобы получить эквивалентное сопротивление меньше, чем сопротивление каждого из резисторов? Обоснуйте ответ.
- Какая связь существует между напряжениями на концах двух последовательно соединенных резисторов и их сопротивлениями?
- В каком из двух соединенных параллельно резисторов ( $R_1 > R_2$ ) сила тока развивает большую мощность?
- Как применяется тепловое действие электрического тока в повседневной жизни и технике?
- Электрическая лампа и соединительные провода соединены последовательно, сила тока в них одинакова. Как объяснить то, что спираль лампы раскаляется, а соединительные провода практически не нагреваются?
- Сформулируйте закон Ома для полной цепи. От чего зависит сила тока в цепи?
- От каких величин зависит КПД электрической цепи?
- Сила тока в резисторе равна 0,4 А, а напряжение на его концах – 10 В. Чему будет равна сила тока в нем при напряжении 15 В? Найдите сопротивление резистора.
- Найдите длину проволоки из константана с площадью поперечного сечения 0,25 мм<sup>2</sup> в катушке с сопротивлением 120 Ом. Удельное сопротивление константана равно  $5 \cdot 10^{-7}$  Ом · м.
- Чему равно сопротивление смешанного соединения резисторов, показанного на рисунке 5.16, если  $R_1 = 6$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом и  $R_3 = 10$  Ом? Каким станет сопротивление соединения, если резисторы  $R_1$  и  $R_2$  поменять местами?

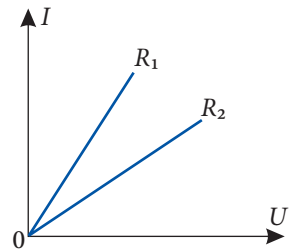


Рис. 5.15

14. Два резистора с сопротивлениями 60 Ом и 36 Ом соединены параллельно. Какое количество теплоты выделится в первом резисторе за время, когда во втором резисторе выделится количество теплоты 15 кДж?

15. В резисторе с сопротивлением 9 Ом, подключенному к источнику тока с ЭДС 4 В, сила тока равна 0,4 А. Вычислите ток короткого замыкания.

16. Источник тока с ЭДС, равной 2 В, и внутренним сопротивлением 1 Ом питает ток в 0,5 А электрическую цепь. Определите внешнее сопротивление цепи, развиваемую в цепи мощность, а также КПД цепи.

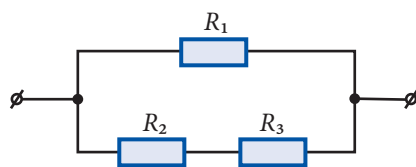


Рис. 5.16

### 5.3\* ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. ПОТЕНЦИОМЕТР

#### а.\* Измерение силы тока. Шунт к амперметру

Сила электрического тока измеряется амперметром, включенным в цепь последовательно для того, чтобы весь электрический заряд, прошедший через соответствующий участок цепи, проходил и через амперметр. Как и у остальных электроизмерительных приборов (их принцип действия будет изучен позже), у амперметра есть электрическое сопротивление ( $R_A$ ). Будучи включенным последовательно, он увеличивает сопротивление цепи, соответственно уменьшая в ней силу тока. В итоге амперметр показывает силу тока в цепи меньше той, что была до его включения. Для уменьшения влияния включения амперметра в цепь на силу тока в ней необходимо, чтобы его сопротивление было намного меньше сопротивления участка цепи, где он находится. Амперметры изготавливают сопротивлением порядка десятых, сотых и даже тысячных долей ома. Каждый амперметр характеризуется не только своим сопротивлением  $R_A$ , но и *максимальным (номинальным) значением силы тока  $I_m$* , которую он может измерить. Включение амперметра в цепь с силой тока  $I > I_m$  может привести к его порче и выходу из строя.

На практике может возникнуть необходимость измерения силы тока, превышающей  $I_m$ . В этом случае используется **шунт** (от англ. *shunt* – ответвление, запасный путь). Это резистор, подключаемый параллельно к амперметру; часть тока проходит через резистор – шунт, мимо амперметра.

Вычислим сопротивление шунта  $R_{ш}$ , подключение которого расширяет предел измерения амперметра в  $n$  раз, то есть позволяет измерять силу тока в цепи  $I_{ц}$  в  $n$  раз больше, чем максимальное значение  $I_m$ . Следовательно,  $I_{ц} = n I_m$ .

На рисунке 5.17 показан амперметр с шунтом. Обозначим силу тока в них через  $I_A$  и  $I_{ш}$ , а силу тока в цепи через  $I_{ц}$ . Понятно, что  $I_{ц} = I_A + I_{ш}$ , а через шунт проходит ток  $I_{ш} = I_{ц} - I_A$ .

Между узлами  $K$  и  $L$  электрическое напряжение  $U_{KL} = I_A R_A = I_{ш} R_{ш}$ , откуда сопротивление шунта:

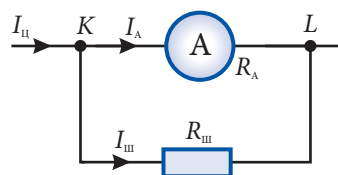


Рис. 5.17

$$R_{\text{ш}} = R_A \cdot \frac{I_A}{I_{\text{ш}}} = R_A \frac{I_A}{I_{\text{ц}} - I_A}.$$

Подставив  $I_A = I_m$  и  $I_{\text{ц}} = nI_m$ , выразим сопротивление шунта через сопротивление амперметра:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n - 1}. \quad (5.26)$$

**Сопротивление шунта, позволяющее расширить предел измерения амперметра в  $n$  раз, в  $(n - 1)$  раз меньше сопротивления амперметра.**

Предположим, требуется измерить силу тока до 10 А амперметром, позволяющим измерять силу тока всего до 2 А. В этом случае  $n = 5$  и сопротивление шунта должно быть в  $(n - 1) = 4$  раза меньше сопротивления амперметра. Очевидно, что теперь одно деление на шкале амперметра будет соответствовать силе тока в  $n = 5$  раз больше, чем до подключения шунта.

Ясно, что сопротивление участка цепи с амперметром и шунтом меньше, чем амперметра без шунта, поэтому амперметр с шунтом меньше изменяет силу тока в цепи.

## 6.\* Измерение электрического напряжения. Добавочное сопротивление

Для измерения напряжения вольтметр подключают параллельно участку цепи. Если сопротивление участка цепи равно  $R$ , а сопротивление вольтметра  $R_V$ , то после подключения вольтметра сопротивление участка станет равным  $R' = \frac{R \cdot R_V}{R + R_V} = \frac{R}{1 + R/R_V}$ .

Заметим, что  $R' < R$ , то есть после подключения вольтметра сопротивление участка цепи уменьшается, соответственно сила тока в цепи возрастает. Вольтметр не показывает реальное напряжение на участке цепи до его подключения.

Из выражения для сопротивления  $R'$  видно, что только при больших значениях сопротивления вольтметра по сравнению с сопротивлением участка цепи  $R$  ( $R_V \gg R$ ) сопротивление  $R'$  практически не будет отличаться от  $R$ . Поэтому вольтметры изготавливают сопротивлением в тысячи, десятки и даже сотни тысяч ом.

Каждый вольтметр может измерять электрическое напряжение, не превышающее некоторое наибольшее значение  $U_m$ , называемое **номинальным значением** или **пределом измерения**. Для расширения предела измерения последовательно с вольтметром соединяют резистор – **добавочное сопротивление** (рис. 5.18).

Вычислим значение добавочного сопротивления, позволяющего расширить предел измерения вольтметра в  $n$  раз и измерять напряжения до значения  $U = nU_m$ .

Обозначим через  $U_V$  напряжение на зажимах вольтметра, через  $U_d$  – напряжение на выводах добавочного сопротивления и через  $U$  – измеряемое напряжение на выводах резистора  $R$ . Вольтметр и добавочное сопротивление соединены последовательно, то есть  $U = U_d + U_V$  или  $U_d = U - U_V$

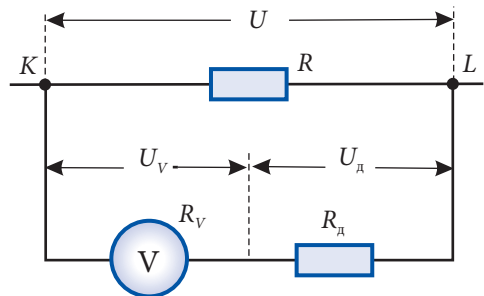


Рис. 5.18

(рис. 5.18). Сила тока  $I_V$  в вольтметре и в добавочном сопротивлении одна и та же, то есть

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} = \frac{U_d}{R_d}.$$

Таким образом,

$$R_d = R_V \cdot \frac{U_d}{U_V} = R_V \cdot \frac{U - U_V}{U_V}.$$

Подставив в последнюю формулу максимальные значения напряжения  $U_V = U_m$  и, соответственно,  $U = nU_m$ , получим значение добавочного сопротивления:

$$R_d = (n - 1)R_V. \quad (5.27)$$

Для расширения в  $n$  раз предела измерения вольтметра последовательно с ним подключают добавочное сопротивление, в  $(n - 1)$  раз большее сопротивления вольтметра.

К примеру, для увеличения предела измерения вольтметра с 15 В до 300 В, то есть в  $n = 20$  раз, последовательно с ним включают добавочное сопротивление в  $(n - 1) = 19$  раз большее, чем сопротивление вольтметра. В этом случае одному делению шкалы вольтметра будет соответствовать напряжение, в 20 раз большее, чем до подключения добавочного сопротивления.

Ясно, что вольтметр с добавочным сопротивлением изменяет силу тока в цепи меньше, чем вольтметр без этого сопротивления.

### в.\* Потенциометр

Выше (п. 4.2, б) вы изучили способ регулирования силы тока в цепи с помощью реостата – устройства с регулируемым сопротивлением. Этот же реостат (с тремя зажимами) может быть использован для регулирования напряжения. В этом случае его называют **делителем напряжения** или **потенциометром**.

Схема подключения потенциометра показана на рисунке 5.19. Источник тока  $I$  подключен к зажимам  $A$  и  $B$  обмотки. Потребитель  $R_n$  подключен к одному из зажимов обмотки (на рис. 5.19 зажим  $A$ ) и к зажиму ползунка  $\Pi$ . Напряжение на потребителе  $R_n$  окажется ниже, чем между зажимами  $A$  и  $B$  реостата. Если ползунок находится около зажима  $A$ , то напряжение питания потребителя равно нулю. Напряжение растет с перемещением ползунка к зажиму  $B$ , пока не станет максимальным.

Понятно, что при некотором положении ползунка напряжение на потребителе зависит и от его сопротивления.

Потенциометры применяют для регулировки громкости в радиоаппаратуре, яркости экрана телевизора, плавного включения и отключения освещения и т. д.

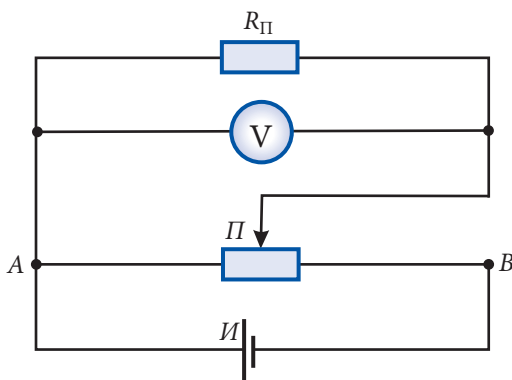


Рис. 5.19

## Пример решения задачи

### Дано:

$$I_M = 2 \text{ A},$$

$$R_0 = 0,02 \text{ Ом},$$

$$U = 300 \text{ В},$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$R_d - ?, R_{ш} - ?$$

Верхний предел измерения школьного амперметра равен  $I_M = 2 \text{ A}$ , а сопротивление –  $R_0 = 0,02 \text{ Ом}$ . Как этот измерительный прибор может быть превращен в вольтметр, которым можно измерять напряжения до  $300 \text{ В}$ , или в амперметр с пределом измерения  $I = 10 \text{ A}$ ?

## Решение

Зная сопротивление измерительного прибора, можно вычислить величину падения напряжения, которое может выдержать этот прибор, то есть верхний предел напряжения

$$U_M = I_M R_0 = 2 \cdot 0,02 = 0,04 \text{ В}.$$

Для использования измерительного прибора в качестве вольтметра, измеряющего напряжение до  $U = 300 \text{ В}$ , последовательно с ним нужно подключить добавочное сопротивление (см. (5.27))

$$R_d = (n - 1) R_0 = \left[ \frac{U}{U_M} - 1 \right] R_0; R_d \approx 150 \text{ Ом}.$$

Если же мы хотим расширить область измерения школьного амперметра, то его нужно шунтировать, то есть параллельно к амперметру присоединить резистор  $R_{ш}$  (см. (5.26)):

$$R_{ш} = \frac{R_0}{n - 1} = \frac{R_0}{I/I_M - 1}; R_{ш} = 0,005 \text{ Ом}.$$

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Как влияет включение амперметра на величину силы тока в цепи? Как можно уменьшить это влияние?
2. Каким должно быть сопротивление вольтметра, чтобы как можно меньше влиять на силу тока в цепи?
3. Как можно расширить предел измерения амперметра? Вольтметра?
4. Объясните принцип регулирования электрического напряжения потенциометром.
5. Найдите соотношение между сопротивлениями амперметра и шунта, с помощью которого предел измерения амперметра был бы увеличен в 15 раз.
6. Амперметр измеряет силу тока, не превышающую  $1,5 \text{ A}$ . Чему должно быть равно сопротивление шунта, чтобы расширить предел измерения до  $12 \text{ A}$ , если сопротивление амперметра равно  $0,014 \text{ Ом}$ ?
7. Для расширения предела измерения вольтметра к нему подключили добавочное сопротивление, в 9 раз большее, чем сопротивление вольтметра. Во сколько раз увеличится предел измерения вольтметра?



## а.\* Классификация и характеристика электроизмерительных приборов

Экспериментальное изучение электрических и магнитных явлений проводится, в первую очередь, электроизмерительными приборами. С их помощью физические величины, описывающие эти явления, преобразуются в форму, доступную для восприятия наблюдателем. Установление связи между измеряемой величиной и показанием прибора называется **эталонированием** измерительного прибора, а качество его эталонирования характеризует **точность** прибора.

Простые электроизмерительные приборы состоят из неподвижной и подвижной частей. Измеряемая величина в результате электромагнитных взаимодействий создает момент сил, вращающий стрелку – подвижную часть прибора. Чтобы положение стрелки однозначно определялось измеряемой величиной, специальное устройство создает противодействующий момент сил, как правило, прямо пропорциональный углу поворота стрелки. Есть еще успокоитель колебаний стрелки. Соответствие между значением измеряемой величины и углом поворота стрелки устанавливается с помощью шкалы, с которой считывают показания прибора:

Величина  $S$ , равная отношению значения углового перемещения стрелки  $\Delta\alpha$ , выраженного в делениях, единицах длины или угла, к значению изменения измеряемой величины  $\Delta X$ , вызвавшей это перемещение, называется **чувствительностью** измерительного прибора:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta X}. \quad (5.28)$$

Ясно, что чем больше изменение угла поворота стрелки при одном и том же изменении измеряемой величины, тем чувствительнее прибор. Чувствительность прибора показывает, насколько близкими могут быть два различных значения измеряемой величины. Если интервал  $\Delta\alpha$  разделить на  $N$  делений, то из (5.28) мы получим величину, обратную чувствительности:

$$C = \frac{1}{S} = \frac{\Delta X}{N}.$$

Это **цена деления**.

Например, микроамперметр (рис. 5.20), шкала которого разделена на 50 делений, можно измерить силу тока до 100 мкА. Его чувствительность  $S = 0,5$  дел./мкА, а цена деления  $C = 2$  мкА/дел.

Развитие электроники, в особенности ее миниатюризация, позволило создать **цифровые электроизмерительные приборы** (рис. 5.21).

В таких приборах значения измеряемых величин видны на **цифровом индикаторе**, соединенном с блоком памяти, генератором импульсов, блоком счета и кодирования. Результаты измерения нака-



Рис. 5.20

пливаются в блоке памяти и по мере необходимости подаются на индикатор или в компьютер.

Электроизмерительные приборы классифицируются по следующим основным признакам:

- по роду **измеряемой величины**: для измерения силы тока применяют *амперметры*, для измерения напряжения – *вольтметры*, для измерения электрического сопротивления – *омметры*, для измерения электрической мощности – *ваттметры* и др.;

- по **роду тока**: *приборы постоянного тока, переменного тока и комбинированные*;

- по **принципу действия**: *приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, тепловой, индукционной и т.д. систем*;

- по **классу точности**: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

Для удобства работы вся эта информация указывается на шкалах электроизмерительных приборов с помощью условных обозначений. Принцип действия прибора обозначается одним из значков, приведенных в *таблице 1*; род тока – значком (–) для постоянного и (~) для переменного токов; способ установки прибора: (↑) или (⊥) – вертикально, (→) или (←) – горизонтально, (↙) – под определенным углом, например  $\angle 60^\circ$ , внутри знака (☆) указывается напряжение в киловольтах, которое выдерживает изоляция прибора, например (☆) – 2 кВ; класс точности – к примеру, 1,5.



Рис. 5.21

Таблица 1

Объяснение условного обозначения	Условное обозначение	Объяснение условного обозначения	Условное обозначение
Прибор магнитоэлектрической системы		Прибор электродинамической системы	
Прибор электромагнитной системы		Прибор тепловой системы	

Часто применяют **многопредельные** и **многофункциональные приборы**. Электрическая схема таких приборов позволяет легко изменять пределы измерения, а также измеряемую величину. Например, цифровой мультиметр (рис. 5.21) в зависимости от положения переключателя может измерять различные физические величины: напряжение и силу тока – как постоянного так и переменного, электрическое сопротивление и электрическую емкость с возможностью изменять пределы измерения, температуру и коэффициент усиления транзисторов.

### 6.\* Погрешности электроизмерительных приборов

Из-за трения, возникающего при движении подвижных частей, любой измерительный прибор вносит в проводимые измерения определенную погрешность – одну из наиболее важных характеристик качества прибора.

Пусть истинное значение исследуемой физической величины равно  $X_0$ , а  $X$  – результат отсчета со шкалы показаний прибора. Тогда модуль их разности

$$\Delta X = |X - X_0| \quad (5.29)$$

называют **абсолютной погрешностью** измерительного прибора, а отношение между абсолютной погрешностью и **пределом измерения** (максимальным значением  $X_{\max}$  шкалы прибора)

$$\varepsilon = \frac{\Delta X}{X_{\max}} \quad (5.30)$$

называют его **относительной погрешностью**.

Выраженная в процентах относительная погрешность соответствует указанному на шкале **классу точности** электроизмерительного прибора.

Если известны класс точности прибора и его предел измерения, то из (5.30) легко находится абсолютная погрешность измерения

$$\Delta X = \varepsilon X_{\max}, \quad (5.31)$$

не зависящая от измеряемого значения, то есть от положения стрелки прибора. Из (5.31) следует, что абсолютная погрешность тем меньше, чем меньше у прибора класс точности. Приборы с классом точности меньше единицы (0,1; 0,2; 0,5) применяют для точных измерений и называют **образцовыми**. В технике применяют приборы с меньшей точностью: 1; 1,5; 2,5; 4, но чаще всего с классом точности 1,5 и 2. В школьных лабораториях у большинства приборов класс точности 4.

Рассмотрим пример вычисления абсолютной погрешности. Вольтметр с гнездами для включения на пределы измерения 3 В, 15 В и 45 В имеет класс точности 5 (то есть  $\varepsilon = 0,05$ ), а ее шкала – 15 делений (рис. 5.22). После подключения к гнездам, соответствующим пределу измерения 3 В, стрелка отклонилась до 12-го деления. В этом случае при цене деления 0,2 В согласно формуле (5.31) абсолютная погрешность измерения напряжения  $\Delta U = 0,05 \cdot 3 \text{ В} = 0,15 \text{ В}$ . Итак, измеренное напряжение  $U = (2,40 \pm 0,15) \text{ В}$ .

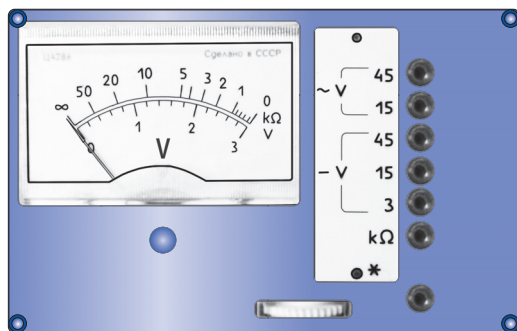


Рис. 5.22

Если же для измерения этого напряжения использовать предел измерения 45 В, то цена деления станет равной 3 В, стрелка отклонится меньше чем на одно деление, абсолютная погрешность станет намного больше:  $\Delta U = 0,05 \cdot 45 \text{ В} = 2,25 \text{ В}$ . Итак,

**для уменьшения погрешности отсчета показаний электроизмерительного прибора необходимо использовать предел измерения, соответствующий наибольшему отклонению стрелки.**

Если на шкале прибора не указан класс точности, абсолютная погрешность его показаний равна половине цены деления. Например, если у миллиамперметра с пределом измерения 150 мА шкала разделена на 50 делений, то абсолютная погрешность  $\Delta I = 0,5 \cdot (150 \text{ мА} : 50) = 1,5 \text{ мА}$ .

1. Что представляет собой эталонирование измерительного прибора?
2. Что называют чувствительностью прибора? Что называют ценой его деления?
3. По каким критериям классифицируются электроизмерительные приборы?
4. Что такое абсолютная погрешность измерительного прибора? А относительная?
5. Какая связь между относительной погрешностью и классом точности прибора?
6. Как нужно произвести измерение, чтобы погрешность отсчета была наименьшей?
7. Как вычисляется абсолютная погрешность, если на шкале прибора не указан класс точности?

Лабораторная работа

1\*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭДС И ВНУТРЕННЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА

<b>Цель работы:</b>	Изучение закона Ома для полной цепи, измерение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока.
<b>Приборы и материалы:</b>	источник тока, реостат, амперметр, вольтметр, ключ, соединительные провода

Краткая теория

Если вольтметр подключить к источнику тока, то его показание  $U_V$  будет отличаться от ЭДС источника тока. В самом деле,

$$U_V = IR_V,$$

где  $R_V$  – внутреннее сопротивление вольтметра. Из закона Ома для всей цепи (5.19) и предыдущего выражения следует:

$$U_V = \frac{\mathcal{E}}{R_V + r} \cdot R_V. \tag{5.32}$$

Из анализа формулы ясно, что чем меньше будет значение  $R_V$  в сравнении с  $r$ , тем больше  $U_V$  будет отличаться от  $\mathcal{E}$ . Как правило, внутреннее сопротивление источника тока очень мало, а вольтметра – велико, практически всегда  $R_V \gg r$ . Из (5.32) следует, что в таком случае вольтметр показывает практически значение ЭДС, то есть  $U_V \approx \mathcal{E}$ . Из закона Ома для участка цепи (5.6) и для полной цепи (5.19), следует:

$$U = \mathcal{E} - Ir. \tag{5.33}$$

Видно, что зависимость  $U = f(I)$  **линейна** (рис. 5.23), но надо учесть, что при больших значениях силы тока (близких к току короткого замыкания) она становится **нелинейной**. В реальных источниках тока происходит изменение значений как ЭДС  $\mathcal{E}$ , так и внутреннего сопротивления.

Для двух выбранных значений напряжения на линейном участке графика (рис. 5.23) из (5.33) имеем:

$$U_1 + I_1 r = U_2 + I_2 r,$$

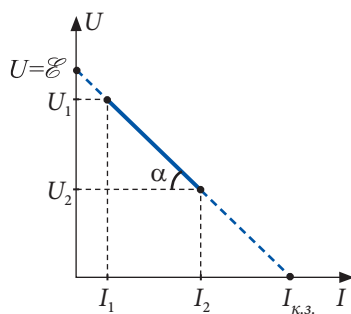


Рис. 5.23

откуда,

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1} = - \frac{\Delta U}{\Delta I}. \quad (5.34)$$

Итак, внутреннее сопротивление источника тока определяется наклоном графика. По графику и из соотношения (5.33) видно, что значение напряжения, полученное на пересечении оси ординат с продолжением линейной части графика ( $I = 0$ ) совпадает с ЭДС. Такое же значение напряжения мы получим при измерении ЭДС источника тока вольтметром с бесконечно большим внутренним сопротивлением. Если продолжить график до пересечения с осью абсцисс ( $U = 0$ ), то получим в точке пересечения значение силы тока короткого замыкания  $I_{к.з.}$  (рис. 5.23).

### Ход работы:

1. Измерьте ЭДС источника тока  $\mathcal{E}_0$ , подключив к нему вольтметр.
2. Соберите цепь по рисунку 5.24, установив ползунок реостата в среднее положение.
3. Замкните ключ  $K$  и, перемещая ползунок, снимите пять различных показаний вольтметра  $U$  и амперметра  $I$ , используя примерно  $3/4$  длины реостата, не допуская больших значений силы тока.
4. Внесите данные опыта в таблицу.

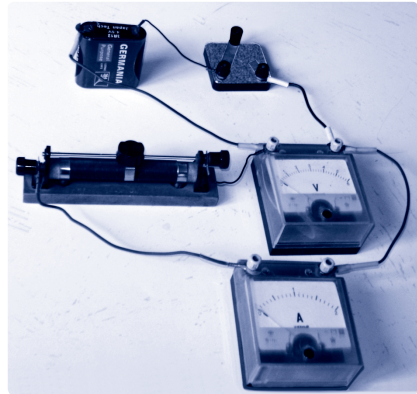


Рис. 5.24

№ опыта	$U$ (В)	$I$ (А)	$\mathcal{E}_0$ (В)	$R$ (Ом)	$\mathcal{E}$ (В)	$I_{к.з.}$ (А)
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

5. Постройте на миллиметровой бумаге график зависимости напряжения  $U$  от силы тока  $I$ , найдите внутреннее сопротивление источника тока, вычислив с помощью выражения (5.34) наклон полученной прямой.
6. Продлите линейную часть графика до пересечения с осями координат и определите ЭДС источника тока  $\mathcal{E}$  и значение силы тока короткого замыкания  $I_{к.з.}$ . Сравните значения ЭДС, полученные из графика ( $\mathcal{E}$ ) и прямым измерением ( $\mathcal{E}_0$ ).
7. Сделайте вывод относительно полученных результатов.

### ВОПРОСЫ

1. Как формулируется закон Ома для участка цепи? Для полной цепи?
2. Каким должно быть внутреннее сопротивление вольтметра? Обоснуйте свой ответ.
3. Почему в работе рекомендуется использовать  $3/4$  длины реостата, исключая небольшие значения его сопротивления?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

<b>Цель работы:</b>	Экспериментальное определение удельного сопротивления металлического проводника с помощью амперметра и вольтметра.
<b>Приборы и материалы:</b>	источник напряжения, реостат, амперметр, вольтметр, проволочный потенциометр, микрометр или штангенциркуль, ключ, соединительные провода.

### Краткая теория

Для определения удельного сопротивления используем проволочный потенциометр. Он представляет собой прибор, состоящий из натянутой металлической проволоки со скользящим вдоль нее контактом. Металлическая проволока из материала с большим удельным сопротивлением (фехраль, нихром, константан, никелин) и скользящий контакт расположены на деревянной шине, снабженной миллиметровыми делениями.

Для регулировки силы тока через исследуемый проводник в цепь (рис. 5.25) включен реостат  $R$ , а длина проводника  $l$  изменяется перемещением скользящего контакта  $C$ .

Используя соотношение (5.8) и математическое выражение закона Ома для участка цепи (5.7), получим формулу для удельного сопротивления проводника

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{US}{Il}.$$

Поперечное сечение проводника выражается через его диаметр  $S = \pi d^2/4$ . Таким образом, для удельного сопротивления получаем:

$$\rho = \frac{\pi U d^2}{4 I l}. \quad (5.35)$$

*Примечание.* В отсутствие проволочного потенциометра можно использовать любой другой проводник из известного материала, например, меди.

В таком случае нужна большая длина проводника (минимум 20 м). Проводник наматывается на какой-либо предмет и включается в цепь так, как на рисунке 5.25. После выполнения первого измерения от проводника отрезают 2–4 м и измерения повторяются несколько раз для других длин. Если длина проводника мала ( $\sim 1$  м), тогда для измерения напряжения на концах проводника необходимо использовать милливольтметр.

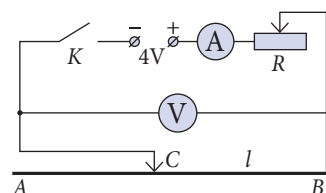


Рис. 5.25

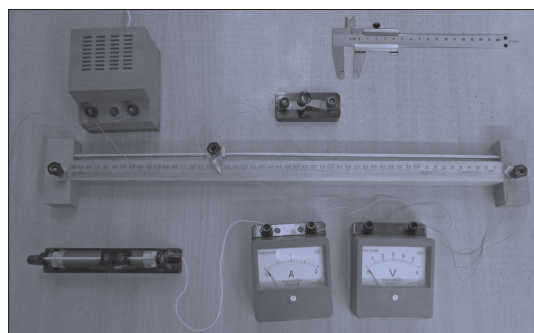


Рис. 5.26

### Ход работы:

1. Соберите установку, как показано на рисунке 5.26, в соответствии с электрической схемой (рис. 5.25).

2. Установите скользящий контакт  $C$  таким образом, чтобы проводник  $AB$  был отключен от цепи, то есть  $l = 0$  (рис. 5.25). Замкните ключ  $K$  и с помощью реостата установите ток в цепи примерно 0,5 А. Разомкните ключ.
3. Переместите скользящий контакт  $C$  таким образом, чтобы полностью ввести в цепь всю длину проводника  $l = AB$ . Замкните ключ и запишите показания амперметра и вольтметра.
4. Повторите пункт 3, перемещая скользящий контакт как минимум в еще два положения, добываясь таким способом других длин металлического проводника.
5. Измерьте штангенциркулем или микрометром диаметр  $d$  проводника.
6. Вычислите, используя выражение (5.35), удельное сопротивление изучаемого металлического проводника.
7. Оцените погрешности (абсолютную и относительную) величины удельного сопротивления по формулам:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{2\Delta d}{d}; \Delta \bar{\rho} = \varepsilon \cdot \bar{\rho}.$$

8. Внесите в нижеследующую таблицу результаты измерений и вычислений:

№ опыта	$l$ (м)	$I$ (А)	$U$ (В)	$d$ ( $10^{-3}$ м)	$\rho$ ( $10^{-8}$ Ом · м)	$\Delta \rho$ ( $10^{-8}$ Ом · м)	$\varepsilon$ (%)
1.							
2.							
3.							
...							
Ср. знач.							

9. Представьте результат в виде  $\rho = (\bar{\rho} \pm \Delta \bar{\rho})$  Ом · м;  $\varepsilon = \dots\%$ .
10. Сформулируйте выводы относительно полученного результата и сравните его с табличным значением.

## ВОПРОСЫ

1. Как зависит сопротивление проводника от его геометрических размеров и природы материала, из которого он изготовлен?
2. Что называется удельным сопротивлением и какова его единица в СИ?
3. Какая из измеряемых величин вносит наибольшую погрешность?

## 5.5

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В МЕТАЛЛАХ

#### а. Электропроводность металлов

В п. 5.1 упоминалось, что свободными носителями электрических зарядов в металлах являются свободные электроны – валентные электроны, которые, будучи слабо связанными с атомами, легко отрываются от них, формируя огромную группу частиц со свойствами газа.

Первый шаг в построении такой модели металла в 1898 году сделал немецкий физик Эдуард Рикке (1845–1915). Он, в 1901 году, закончил важный опыт, в котором в течение длительного времени через последовательно соединенные проводники из различных металлов пропускался ток примерно в 10 А. Дополнительного взаимного проникновения одного металла в другой, кроме допускаемого диффузией, обнаружено не было. Это означало: атомы не участвуют в переносе электрических зарядов в металлических проводниках.

В 1900 году немецкий физик Пауль Друде (1863–1906) предположил, что в отсутствие внешнего электрического поля свободные электроны в металлах движутся хаотически, образуя **электронный газ**. Если проводник находится во внешнем электрическом поле, то свободные электроны под действием электрических сил движутся ускоренно и на хаотическое тепловое движение электронов накладываются их упорядоченное движение. Оно и представляет собой электрический ток.

Американские ученые Т. Стюарт и Р. Толмэн в 1916 году опытным путем доказали, что носителями свободных электрических зарядов в металлах являются электроны. Катушка с большим числом витков была укреплена на одной оси с двумя металлическими дисками, соединенными с ее выводами (рис. 5.27). К дискам прижимались две упругие пластины, подключенные к гальванометру. Катушка с дисками приводилась в быстрое вращение, затем резко останавливалась. Благодаря инерции свободные заряды продолжали движение. В цепи возникал кратковременный ток. Опыт позволил установить знак носителей заряда и отношение между величиной электрического заряда носителей и их массой. Они совпали со значениями, полученными для электронов другими методами. Так была окончательно установлена природа свободных носителей электрических зарядов в металлах.

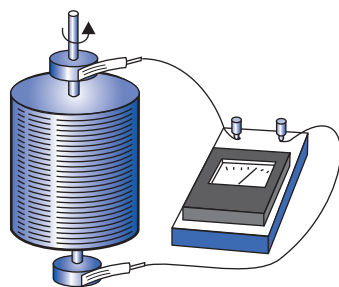


Рис. 5.27

### 6.\* Закон Ома в электронной теории металлов

Установим связь между силой тока и средней скоростью упорядоченного движения свободных электронов. В куске металлического проводника длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  (рис. 5.28) с концентрацией свободных электронов  $n$  в объеме  $V = lS$  находится  $N = nV = nls$  свободных электронов. Заряд одного электрона – элементарный заряд  $e$ , а заряд  $N$  свободных электронов  $q = Ne = nels$ .

Электроны в своем упорядоченном движении со средней скоростью  $v$  преодолевают расстояние  $l$  за время  $t = l/v$ . За этот промежуток времени все свободные электроны, находящиеся между поперечными сечениями 1 и 2, проходят через сечение 1, перенося отрицательный заряд  $q$ . Это равносильно переносу положительного заряда с тем же значением  $q$  через сечение 2. Сила тока

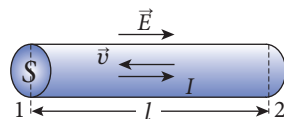


Рис. 5.28

$$I = \frac{q}{t} = neSv. \quad (5.36)$$



Вычислим среднюю скорость  $v$ . Однородное электрическое поле напряженностью  $E$  действует на каждый электрон с силой, равной по модулю  $F = eE$  и направленной в сторону, противоположную вектору  $\vec{E}$ . Она сообщает электрону ускорение:

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{eE}{m_e}, \quad (5.37)$$

где  $m_e$  – масса электрона. Ускорение  $a$  постоянно, поэтому упорядоченное движение электрона равноускоренное. Его ограничивает во времени соударение свободных электронов с ионами данного металла и примесей, содержащихся в нем. Обозначим через  $\tau$  средний интервал времени между двумя последовательными соударениями одного электрона. Предположим, что при каждом соударении электрон передает иону кинетическую энергию упорядоченного движения и после каждого соударения это движение заново начинается с нулевой начальной скорости. Максимальная скорость непосредственно перед соударением равна:

$$v_{\max} = a\tau = \frac{e\tau}{m_e} E. \quad (5.38)$$

Средняя скорость при равноускоренном движении (и только при равноускоренном!) равна полусумме начальной и конечной скоростей. Получим:

$$v = \frac{0 + v_{\max}}{2} = \frac{e\tau}{2m_e} E. \quad (5.39)$$

Подставив (5.39) в (5.36), получим для силы тока:  $I = \frac{ne^2\tau}{2m_e} ES$ .

Выразим напряженность электрического поля  $E$  через отношение электрического напряжения  $U$  между концами проводника к его длине  $l$ , то есть  $E = U/l$ . Тогда сила тока в проводнике равна:

$$I = \frac{ne^2\tau}{2m_e} \frac{S}{l} U. \quad (5.40)$$

В рамках электронной теории металлов получен закон Ома. Сравнив (5.40) с (5.6) – законом Ома для однородного участка цепи  $I = U/R$ , получим выражение для сопротивления:

$$R = \frac{2m_e}{ne^2\tau} \cdot \frac{l}{S}. \quad (5.41)$$

Получен еще один важный результат: выражение (5.8) для сопротивления проводника, зависящего от геометрических размеров, и выражение для удельного сопротивления металла:

$$\rho = \frac{2m_e}{ne^2\tau}. \quad (5.42)$$

Простое перечисление полученных формул – (5.40)–(5.42) показывает возможности электронной теории металлов. Позже теория получила свое дальнейшее развитие, с ее помощью объяснили многие электрические, магнитные, тепловые, оптические свойства металлов. Например, вычислив кинетическую энергию, передаваемую электронами ионам кристаллической решетки, можно получить закон Джоуля.

## в.\* Закон Джоуля в электронной теории

Выше было отмечено, что при столкновении с ионами электрон передает им максимальную кинетическую энергию своего направленного движения, то есть энергию  $m_e v_{\max}^2/2$ . В результате, энергия теплового движения ионов увеличивается и температура металла растет, что соответствует выделению некоторого количества теплоты. Вычислим это количество теплоты.

За промежуток времени  $t$  электрон претерпевает  $t/\tau$  столкновений, где  $\tau$  – средний интервал времени между двумя соседними столкновениями, и передает ионам энергию равную  $\frac{m_e v_{\max}^2}{2} \cdot \frac{t}{\tau}$ . В объеме  $Sl$  проводника находится  $nSl$  электронов. Выделенная теплота, равная сумме кинетических энергий переданных ионам за время  $t$  всеми электронами

$$Q = nSl \cdot \frac{m_e v_{\max}^2}{2} \cdot \frac{t}{\tau}.$$

Подставляя выражение (5.38) для максимальной скорости электронов в своем направленном движении и учитывая соотношение между напряженностью электрического поля  $E = U/l$  и напряжением  $E$  на концах проводника  $U$ , получим:

$$Q = \frac{ne^2\tau}{2m_e} \cdot \frac{S}{l} U^2 t.$$

Учитывая соотношение (5.41) для сопротивления проводника, имеем:

$$Q = \frac{U^2}{R} t = I^2 R t,$$

то есть известное соотношение (5.16) для закона Джоуля.

## г. Зависимость удельного сопротивления металлов от температуры

Выражение для удельного сопротивления металла (5.42) содержит две постоянные величины: элементарный заряд  $e$  и массу электрона  $m_e$  – универсальные постоянные. От температуры зависят: концентрация электронов  $n$  и средний интервал времени  $t$  между двумя последовательными соударениями электрона с ионами металла.

Концентрация  $n$  изменяется с температурой благодаря изменению объема при тепловом расширении. Увеличение объема проводника при нагревании приводит к уменьшению числа электронов в единице объема – концентрация  $n$  уменьшается. Коэффициенты теплового расширения металлов малы, порядка  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ . Поэтому увеличение объема проводника на 1% (уменьшение концентрации  $n$  на 1%) происходит только при нагреве на 1 000 К. Изменение температуры на сотню – другую кельвин практически не меняет концентрацию свободных электронов.

Намного заметнее зависит от температуры среднее время  $\tau$  между последовательными соударениями электронов. При повышении температуры металла колебания ионов в узлах кристаллической решетки становятся интенсивнее, их амплитуды растут, соударения свободных электронов с ионами происходят чаще, среднее время  $\tau$  между соударениями уменьшается. Согласно формуле (5.42) **удельное сопротивление металла при нагревании увеличивается.**

Исследования показали, что удельное сопротивление растет с температурой линейно. Пусть  $\rho_0$  – удельное сопротивление металла при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\rho$  – удельное сопротивление при

температуре  $t$ , то есть при нагреве на  $t$  градусов. Абсолютное увеличение удельного сопротивления равно  $(\rho - \rho_0)$ , а относительное равно  $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0}$ . Опыты показали, что  $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} \sim t$ .

Перейдем к равенству, введя коэффициент пропорциональности  $\alpha$  получаем:

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \alpha t. \quad (5.43)$$

Коэффициент  $\alpha$ , называемый **температурным коэффициентом сопротивления**, зависит от природы металла. Из (5.43) ясно, что  $[\alpha] = \text{K}^{-1}$ .

У большинства металлов  $\alpha \approx 0,004 \text{ K}^{-1}$ . Это во много раз больше коэффициента теплового расширения ( $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ), что подтверждает сделанное ранее предположение о том, что изменение размеров проводника из-за теплового расширения не влияет заметно на сопротивление проводника.

Из (5.43) удельное сопротивление при температуре  $t$  равно:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t). \quad (5.44)$$

График этой зависимости показан на *рис. 5.29*.

Умножим обе части выражения (5.44) на отношение длины проводника к площади его поперечного сечения, практически одинакового для обеих температур ( $l/S \approx l_0/S_0$ ). Учитывая формулу (5.8), получим зависимость сопротивления проводника от температуры:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (5.45)$$

где  $R_0$  – сопротивление проводника при  $0^\circ\text{C}$ , а  $R$  – при температуре  $t$ . График этой зависимости подобен графику на *рисунке 5.29*.

Влияние температуры на сопротивление проводника можно наблюдать на опыте (*рис. 5.30*), где последовательно соединены источник тока  $A$ , лампа  $L$  (6 В) и проволочная спираль  $C$ . При нагревании спирали пламенем спиртовки яркость свечения лампы уменьшается, что объясняется ростом сопротивления спирали и, следовательно, всей цепи.

В том, что сопротивление проводника зависит от температуры, можно убедиться и измеряя сопротивление нити накаливания лампы. Сопротивление раскаленной нити примерно в 10 раз больше, чем холодной.

Применяя закон Ома, надо помнить, что сила тока прямо пропорциональна напряжению только в случае, если сопротивление участка цепи постоянно (*рис. 5.31, кривая 1*).

Прохождение тока сопровождается выделением количества теплоты, проводник нагревается, его сопротивление растет, значения силы тока становятся меньше, чем в случае постоянного сопротивления. С ростом напряжения наблюдается все большее отклонение от закона Ома (прямой пропорциональной зависимости) (*рис. 5.31, кривая 2*).

Зависимость сопротивления металлического проводника от температуры используют в **термометрах сопротивления**. Чувствительным элементом является прово-

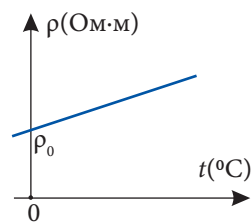


Рис. 5.29

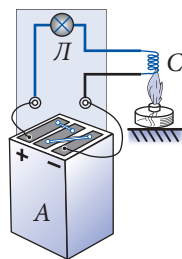


Рис. 5.30

лочка из платины, меди, никеля или кадмия. Ее наматывают на каркас из кварца или керамики. Измеряя сопротивление проволочки, можно определить температуру с высокой точностью, до 0,001 К. Преимущество термометров сопротивления – возможность измерения и низких, и высоких температур. Например, платиновым термометром можно измерять температуру в интервале от  $-263^{\circ}\text{C}$  до  $+1063^{\circ}\text{C}$ , а медным – от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+180^{\circ}\text{C}$ .

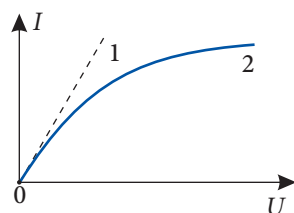


Рис. 5.31

Для изготовления эталонных сопротивлений и добавочных сопротивлений для вольтметров используют сплавы с постоянным удельным сопротивлением в широком диапазоне температур. Это, например, константан – сплав меди с никелем. У него температурный коэффициент сопротивления примерно равен  $10^{-5} \text{ K}^{-1}$ , в сотни раз меньше чем у чистых металлов.

#### д.\* Сверхпроводимость

В 1908 году в лаборатории голландского физика Хейке Камерлинг–Оннеса (1853 – 1926) впервые был получен жидкий гелий, сконденсировавшийся при нормальном атмосферном давлении и температуре 4,21 К. Так появилась возможность изучения свойств вещества при очень низких температурах.

Исследуя зависимость сопротивления металлов от температуры, в 1911 году Камерлинг–Оннес обнаружил, что сопротивление ртути, как и всех металлов (см. п. 5.5, в), плавно снижается с уменьшением температуры только до 4,15 К, затем резко падает до нуля (рис. 5.32). Температуру, при которой исчезает электрическое сопротивление, назвали **критической температурой** ( $T_k$ ), а состояние вещества при температурах ниже критической – **сверхпроводящим состоянием**. О веществе с температурой выше  $T_k$ , когда его сопротивление отличается от нуля, говорят, что оно находится в нормальном состоянии. Свойство вещества резко уменьшать сопротивление (до нуля) назвали **сверхпроводимостью**, а вещества, обладающие этим свойством, – **сверхпроводниками**.

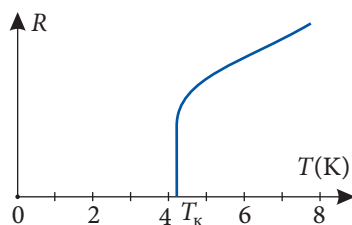


Рис. 5.32

Примерно у половины чистых металлов обнаружили сверхпроводящее состояние, самая высокая критическая температура оказалась у ниобия ( $T_k = 9,22 \text{ K}$ ). Позже было получено около 1000 сплавов и соединений, обладающих сверхпроводимостью.

Не только отсутствием электрического сопротивления интересны сверхпроводники. Необычны и их магнитные свойства. Внешнее магнитное поле проникает внутрь куска металла в нормальном состоянии. При переходе металла в состояние сверхпроводимости магнитное поле «выталкивается» из металла.

Это свойство можно пронаблюдать, опуская подвешенный на нити постоянный магнит в сверхпроводящую чашу. На некоторой высоте над сверхпроводником магнит начинает «парить», а нить свободно провисает (рис. 5.33). Опыт известен под названием «Гроб Мухаммеда» (согласно легенде гроб Мухаммеда, основателя мусульманской религии, парит в воздухе без посторонней помощи).

В сильных магнитных полях состояние сверхпроводимости исчезает, вещество переходит в нормальное состояние. Из курса физики VIII класса известно, что вокруг проводника с током существует магнитное поле. В сверхпроводящем кабеле увеличение силы тока сопровождается усилением созданного этим током магнитного поля, что приводит в итоге к переходу вещества в нормальное состояние и появлению электрического сопротивления. Таким образом, сила тока в сверхпроводящем кабеле ограничена некоторым критическим значением. Ученым удалось синтезировать вещество и изготовить из него сверхпроводящий кабель, по которому проходит ток около 7 500 А.

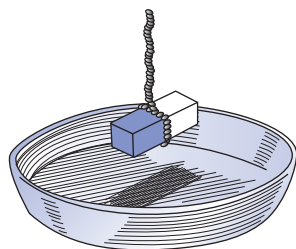


Рис. 5.33

Применение сверхпроводников различно. В электроэнергетике сверхпроводящие кабели могут передавать на большие расстояния электрическую энергию без потерь. В кольце из сверхпроводника неограниченное время может существовать электрический ток, энергию которого можно использовать по мере необходимости. Сверхпроводящие обмотки электромагнитов позволяют получать сильные поля, изготовлять установки меньших размеров, чем из обычных материалов. Применение сверхпроводников позволяет увеличить скорость работы компьютеров.

В разных странах проводятся работы по использованию в железнодорожном транспорте «магнитной подушки» – эффекта отталкивания магнитов. Вагоны оборудованы сверхпроводящими магнитами, поддерживающими их над дорогой. Первая модель была изготовлена в Японии в 70-х годах XX века (рис. 5.34). Вагон массой 2000 кг размерами 4×1,5×0,8 м двигался со скоростью 50 км/ч по дороге длиной 400 м. Предполагается, что транспорт на «магнитной подушке» (без колес!) сможет развить скорость до 500 км/ч.

Практическое применение сверхпроводников пока ограничено, так как требует сверхнизких температур, получаемых с помощью достаточно дорогого жидкого гелия. Внимание ученых привлекает проблема сверхпроводимости при температуре выше 100 К, которую легко достичь с помощью дешевого жидкого азота, получаемого в больших количествах. Первые обнадеживающие результаты были получены в 1986 году Й. Беднорцом и К. Мюллером, создавших керамические материалы из оксидов лантана, бария, меди, переходивших в сверхпроводящее состояние при  $T_k = 35$  К. Продолжая работу, заменив лантан на иттрий, они получили сверхпроводник с  $T_k = 98$  К. Применение подобных материалов из-за их хрупкости затруднено. Исследования продолжаются. Сейчас получено вещество с  $T_k = 135$  К.

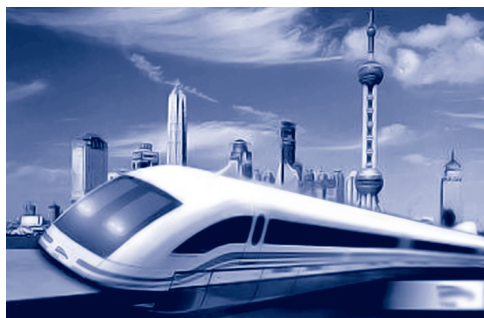


Рис. 5.34

Природа сверхпроводимости была выяснена в 1957 году в рамках теории, разработанной учеными из США: Дж. Бардиным, Л. Купером, Дж. Шриффером и независимо от них Н. Боголюбовым из СССР. Было установлено, что сверх-

проводимость является проявлением на макроскопическом уровне законов квантовой физики, которые проявляются и в мире атомов (с некоторыми из них вы ознакомитесь в XII классе).

В Академии наук Молдовы под руководством академика Всеволода Москаленко (р. в 1928 г.) проведены исследования по теории сверхпроводимости, была разработана модель сверхпроводника, применимая как для низких, так и для высоких температур.

### Пример решения задачи

1

**Дано:**

$$S = 0,8 \text{ мм}^2,$$

$$I = 6 \text{ А},$$

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$M = 27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$v - ?$$

**СИ:**

$$8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$$

Через алюминиевый проводник с поперечным сечением  $S = 0,8 \text{ мм}^2$  течет ток 6 А. Определите среднюю скорость упорядоченного движения электронов, считая, что каждый атом алюминия этого проводника содержит по одному свободному электрону. Плотность и молярная масса алюминия  $\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $M = 27 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ , соответственно.

м/с

### Решение

Определим среднюю скорость упорядоченного движения электронов из выражения (5.36) для силы тока через проводник длиной  $l$  и поперечным сечением  $S$ :

$$v = \frac{I}{neS},$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  – это заряд электрона, а  $n = \frac{N}{V} = \frac{N}{lS}$  – концентрация электронов, выраженной через их число  $N$  в единице объема  $V = lS$ .

Согласно условиям задачи число электронов равно числу атомов, содержащихся в исследуемом проводнике. Из формулы, определяющей количество вещества  $\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$ , получаем:

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

а для концентрации электронов, равной концентрации атомов

$$n = n_a = \frac{N}{V} = \frac{m}{MV} N_A = \frac{\rho N_A}{M},$$

где  $\rho$  и  $M$  – это плотность и молярная масса алюминия,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – число Авогадро.

Таким образом, средняя скорость упорядоченного движения электронов равна:

$$v = \frac{IM}{\rho e N_A S} = \frac{6 \cdot 27 \cdot 10^{-3}}{2,7 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \cdot 8 \cdot 10^{-7}} \approx 0,78 \frac{\text{мм}}{\text{с}}.$$

**Дано:**

$$R_A = 0,02 \text{ Ом},$$

$$R_0 = 20 \text{ Ом},$$

$$I_0 = 2 \text{ А},$$

$$t^\circ = 60 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$$

$$I - ?$$

Катушка медной проволоки, амперметр и источник тока с пренебрежимо малым внутренним сопротивлением соединены последовательно и образуют замкнутую цепь. Сопротивление амперметра равно  $R_A = 0,02 \text{ Ом}$ , а катушки при температуре  $0^\circ\text{C}$  –  $20 \text{ Ом}$ . Сила тока при этой температуре  $I_0 = 2 \text{ А}$ . Каким будет показание амперметра при температуре катушки  $60^\circ\text{C}$ ? Температурный коэффициент сопротивления меди равен  $4,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ .

**Решение**

При последовательном соединении катушки и амперметра внешнее сопротивление цепи при  $0^\circ\text{C}$  равно  $R_0 + R_A$ , а при температуре  $60^\circ\text{C}$  –  $(R + R_A)$ , где  $R = R_0(1 + \alpha t)$  – это сопротивление катушки при температуре  $t$ ,  $R_0$  – ее сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

С учетом того, что внутреннее сопротивление источника тока пренебрежимо мало, закон Ома для температур  $0^\circ\text{C}$  и  $t^\circ$  принимает вид:

$$I_0 = \frac{\mathcal{E}}{R_0 + R_A} \text{ и } I = \frac{\mathcal{E}}{R + R_A}.$$

Исключив  $\mathcal{E}$  из этих уравнений и приняв во внимание зависимость сопротивления  $R$  от температуры, для силы тока, которую показывает амперметр, получаем:

$$I = \frac{R_0 + R_A}{R + R_A} I_0 = \frac{R_0 + R_A}{R_0(1 + \alpha t) + R_A} I_0 = \frac{(20 + 0,02) 2}{20(1 + 4,3 \cdot 10^{-3} \cdot 60) + 0,02} \approx 1,59 \text{ А}.$$

**ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ**

1. В чем суть опыта Стюарта-Толмена?
- 2.\* При замыкании цепи, состоящей из источника тока, мощной лампы и амперметра показания прибора вначале были большими, затем уменьшились. Как вы это объясните? Постройте примерный график зависимости силы тока от времени.
- 3.\* Какие факторы определяют зависимость удельного сопротивления от температуры? Какой является главным?
4. Как работает термометр сопротивления?
- 5.\* В чем состоит явление сверхпроводимости?
- 6.\* Какую температуру называют критической?
- 7.\* Как сверхпроводники взаимодействуют с магнитным полем? Где применяют это взаимодействие?
- 8.\* Может ли по сверхпроводящему кабелю протекать электрический ток любой величины без его перехода в нормальное состояние? Объясните свой ответ.
- 9.\* Зная выражение (5.7) для удельного сопротивления, найдите средний промежуток времени между двумя последовательными соударениями свободного электрона с ионами в медном проводнике. Удельное сопротивление меди  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , концентрация электронов  $n = 8,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ .

10. Удельное сопротивление алюминия при  $20^\circ\text{C}$  равно  $2,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, температурный коэффициент сопротивления равен  $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Чему равно его удельное сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ,  $220^\circ\text{C}$ ?
11. Сопротивление вольфрамовой нити лампы накаливания при  $20^\circ\text{C}$  равно 2,5 Ом, а во время работы лампы – 30 Ом. Чему в этом случае равна температура нити? Температурный коэффициент сопротивления равен  $4,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

## 5.6

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

#### а. Электрические свойства полупроводников

Нам уже известны две категории вещества с различными электрическими свойствами: проводники и изоляторы (диэлектрики). Их удельные сопротивления очень сильно отличаются: у проводников  $\rho_n < 10^{-6}$  Ом·м и у изоляторов  $\rho_n > 10^8$  Ом·м.

В природе существуют вещества с промежуточными значениями удельного сопротивления – между  $10^{-3}$  Ом·м и  $10^7$  Ом·м. Их называют **полупроводниками**. Часть из них – простые вещества: кремний (Si), германий (Ge), селен (Se) и др., сложные вещества: арсенид галлия (GaAs), селенид кадмия (CdSe), фосфат индия (InP), оксиды (окислы) магния, меди, кобальта и др.

Электрические свойства полупроводников в значительной степени зависят от внешних условий, в которых они находятся.

Зависимость сопротивления полупроводника от температуры можно пронаблюдать с помощью электрической цепи (рис. 5.35), состоящей из источника тока, гальванометра и полупроводника. Видно, что до нагрева полупроводника показания гальванометра почти не отличаются от нуля. Нагрев полупроводника приводит к значительному отклонению стрелки прибора (росту силы тока в цепи). Следовательно, его сопротивление (и удельное сопротивление) уменьшается с ростом температуры – кривая 1 на рисунке 5.36. Для сравнения показана и зависимость 2 удельного сопротивления металла от температуры.

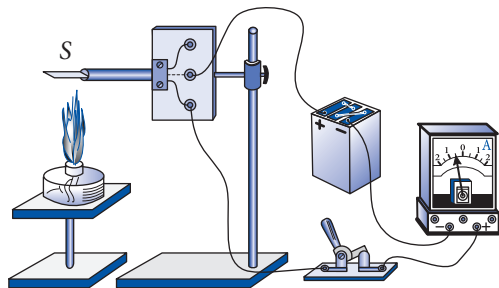


Рис. 5.35

На электропроводность полупроводников влияет и их освещенность. Соберем цепь, аналогичную рисунку 5.35, используя полупроводник в коробке с непрозрачными стенками. Если коробка закрыта, то стрелка прибора находится недалеко от нуля шкалы. Если открыть коробку и осветить полупроводник, то показания прибора увеличатся. Это означает, что удельное сопротивление полупроводника зависит от его освещенности.

Эти свойства полупроводников широко используют в автоматических системах управления различными

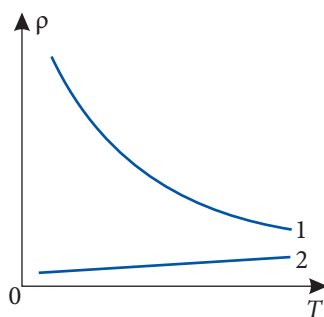


Рис. 5.36



процессами, для измерения температуры, освещенности и т. д.

**Терморезистор**, или **термистор**, – это простой полупроводниковый прибор, сопротивление которого зависит от температуры. На *рисунке 5.37* показана принципиальная схема устройства, поддерживающего температуру в помещении в узком интервале, например в инкубаторе или складе.

В устройстве две электрические цепи. Цепь I состоит из источника тока  $I_1$ , нагревательного элемента  $H$ , упругой стальной пластинки  $П$ . Пластинка одним концом закреплена в точке  $O$ , а другим касается проводящего стержня. Цепь II состоит из источника тока  $I$ , термистора  $T$  и электромагнита  $\mathcal{E}$ . Когда температура в помещении достигает верхнего допустимого предела, сопротивление термистора  $T$  становится малым, сила тока в цепи II возрастает так, что электромагнит  $\mathcal{E}$  притягивает пластинку  $П$  и цепь I размыкается. Нагревательный элемент и термистор остывают, сопротивление термистора возрастает, сила тока в цепи II уменьшается и в некоторый момент электромагнит  $\mathcal{E}$  уже не удерживает пластинку  $П$ . Она отрывается от электромагнита и замыкает цепь I. Нагревательный элемент опять включается и т.д.

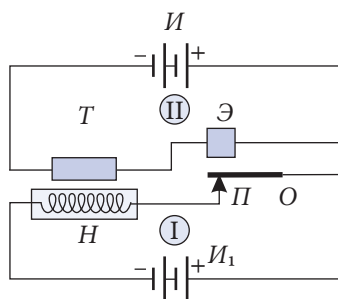


Рис. 5.37

Зависимость сопротивления полупроводника от освещенности применяется в **фоторезисторах**. Схема устройства для управления уличным освещением похожа на схему, приведенную на *рисунке 5.11*. Вместо нагревательного элемента  $H$  подключается цепь из электрических ламп, а вместо термистора  $T$  – фоторезистор. На него не должен падать свет от ламп. Утром падающий на фоторезистор свет уменьшает его сопротивление, что увеличивает силу тока в катушке электромагнита  $\mathcal{E}$ . Пластинка  $П$  притягивается к электромагниту и размыкает цепь освещения. Вечером с заходом Солнца темнеет, происходит обратный процесс, и лампы включаются.

## 6. Свободные носители электрического заряда в полупроводниках. Собственная проводимость

Чтобы объяснить описанные выше свойства полупроводников, рассмотрим их внутреннее строение, выясним природу свободных электрических зарядов. Пусть это будет, к примеру, кристалл кремния. Его атомы четырехвалентны. У каждого атома в кристалле 4 соседа, расположенных в вершинах тетраэдра. В центре тетраэдра находится рассматриваемый атом (*рис. 5.38*). Между атомами осуществляется ковалентная связь, на каждую приходится пара электронов, по одному валентному электрону от каждого атома. Для простоты заменим объемную модель кристалла плоской (*рис. 5.39*).

При низких температурах связи не разрываются, кристалл не содержит свободных электрических зарядов, он хороший изолятор. По мере нагревания тепловое движение атомов усиливается, их кинетическая энергия возрастает.

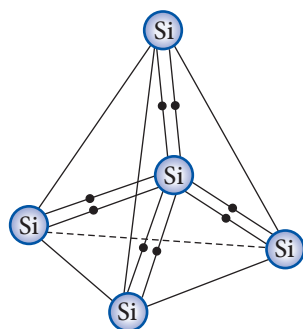


Рис. 5.38

Некоторые электроны покидают атомы, разрывают ковалентные связи и становятся свободными. Они называются **электронами проводимости**, обозначаются буквой  $n$ , их графический символ  $\bullet$ .

Но это не единственные свободные носители электрических зарядов в полупроводниках. Оставленные электронами места в связях играют роль положительных зарядов. Их называют дырками, обозначают буквой  $p$ , графический символ  $\circ$  (рис. 5.39).

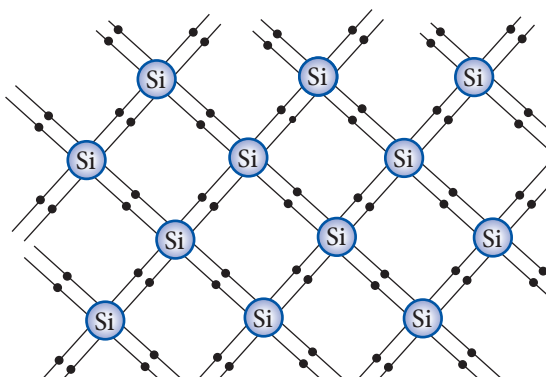


Рис. 5.39

Такие места могут быть заняты соседними электронами связи. Тогда где-то рядом образуется дырка, играющая роль положительного заряда. На рисунке 5.40 а, б дырка из связи 1 «переместилась» в связь 2, что объясняется переходом валентного, связанного электрона из 2 в 1. Так непрерывные поочередные перемещения связанных электронов на соседние «свободные места» приводят к перемещению в обратном направлении заряженных положительно дырок.

Итак, в полупроводниках существует два типа свободных носителей зарядов: **электроны проводимости** и **дырки**. В чистом кристалле эти носители находятся в одинаковых количествах.

В отсутствие внешнего электрического поля свободные носители зарядов движутся хаотически. Если создать электрическое поле, то дырки, имея положительный заряд, начнут двигаться в направлении этого поля, а электроны проводимости – в обратном направлении. Проводимость чистых полупроводников называют собственной проводимостью.

Рост температуры полупроводника сопровождается ростом концентрации электронов проводимости и, соответственно, дырок. Удельное сопротивление полупроводника уменьшается. Эта зависимость показана на графике (рис. 5.36, кривая 1).

Концентрацию свободных носителей зарядов в полупроводнике можно увеличить освещением. Под воздействием света часть валентных связанных электронов

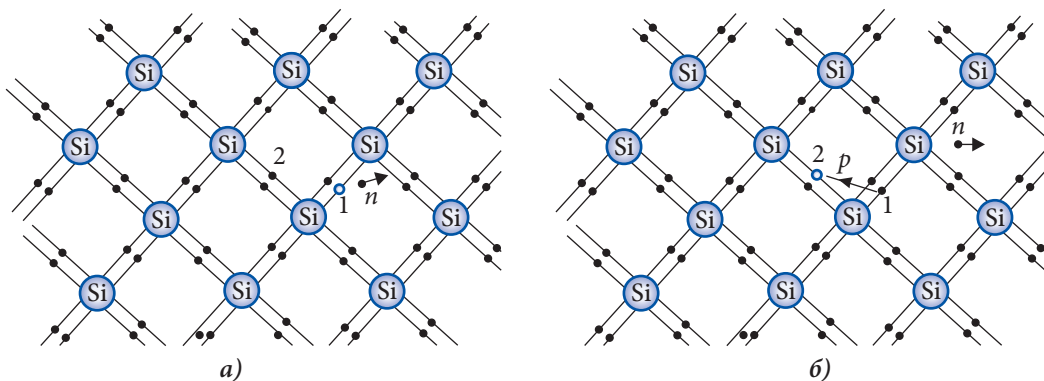


Рис. 5.40

получает дополнительную энергию и становится свободной. Это явление называют **внутренним фотоэффектом** (электроны остаются внутри кристалла).

Ясно, что рост концентрации свободных носителей зарядов уменьшает удельное сопротивление полупроводника.

Так объясняются свойства полупроводников, с которыми вы ознакомились в п. 5.6, а. На полупроводники влияют и другие излучения: например, рентгеновские лучи, потоки заряженных частиц.

## в. Примесная проводимость полупроводников

Электрические свойства полупроводников сильно зависят от примесей и от дефектов в кристаллической решетке. Под примесями подразумеваются атомы других химических элементов, находящиеся в узлах кристаллической решетки полупроводника.

Рассмотрим конкретный случай: в кристалле кремния некоторые узлы заняты атомами элемента с другой валентностью.

Пусть вместо четырехвалентного атома кремния узел решетки занимает атом пятивалентного фосфора P (или мышьяка As, сурьмы Sb, ...) Для обеспечения ковалентной связи с 4 соседними атомами кремния пойдут 4 валентных электрона фосфора. Пятый электрон связан с атомом фосфора слабее, чем электроны в ковалентной связи (рис. 5.41). Поэтому он может покинуть атом фосфора при температуре ниже, чем электроны при разрыве ковалентной связи. В итоге каждый пятивалентный атом

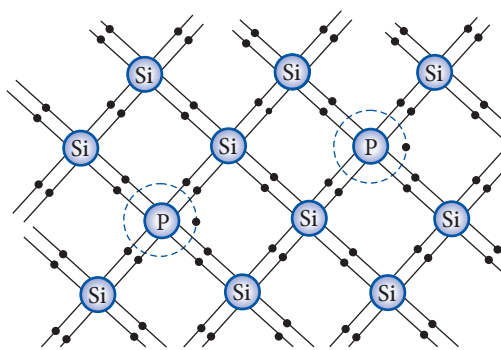


Рис. 5.41

теряет по одному электрону, который становится свободным (*электроном проводимости*), а атом – положительным ионом кристаллической решетки. Такие атомы называют **донорами**, а примеси – донорными (от лат. *donare* – дарить, жертвовать).

Четырехвалентный полупроводник с примесью пятивалентных атомов содержит дополнительное число электронов проводимости, равное числу атомов примеси, превратившихся в положительные ионы. Его называют **полупроводником n-типа** (от лат. *negativ* – отрицательный), а его проводимость – **примесной проводимостью n-типа**.

Другой результат даст замена четырехвалентного атома кремния на трехвалентный индий In (или галлий Ga, бор B, ...). У атомов примесей не хватает одного электрона для 4 ковалентных связей с 4 соседними атомами кремния. Эту связь может заполнить электрон из ковалентной связи между двумя атомами кремния, где возникнет дырка (рис. 5.42). Атомы примесей в этом случае называют **акцепторами** (от лат. *acceptor* – приемщик). После присоединения электрона трехвалентный атом превращается в отрицательный ион, а в оставленной этим электроном связи появится дырка.

Итак, четырехвалентный полупроводник с примесью трехвалентных атомов в узлах решетки содержит дополнительное число дырок, равное числу атомов примеси, превратившихся в отрицательные ионы. Его называют **полупроводником p-типа** (от лат. *positiv* – положительный), а его проводимость – **примесной проводимостью p-типа**.

С ростом температуры полупроводника с примесями все больше электронов покидает ковалентные связи становясь свободными, соответственно растет и число дырок. В **полупроводниках  $n$ -типа** концентрация электронов проводимости больше, чем дырок. **Электроны проводимости** называют **основными носителями**, а **дырки** – **неосновными носителями**. В **полупроводниках  $p$ -типа** наоборот – **дырки являются основными носителями**, а **электроны – неосновными носителями**. В обоих случаях разность между концентрациями основных и неосновных носителей достигает концентрации атомов примеси.

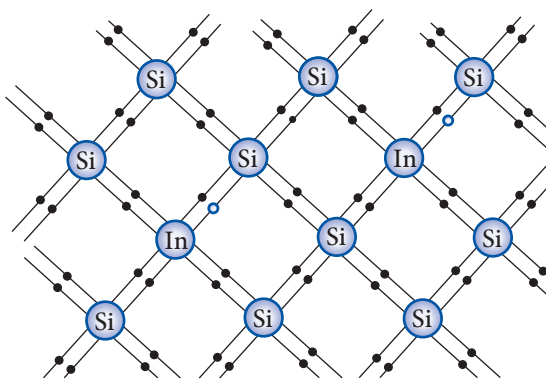


Рис. 5.42

При высоких температурах концентрация свободных носителей зарядов становится намного выше концентрации атомов примеси. Роль примеси становится незначительной, полупроводник с примесями ведет себя как соответствующий чистый полупроводник, примесная проводимость приближается по своим свойствам к собственной проводимости.

### г. $p$ - $n$ -переход. Полупроводниковый диод

Рассмотрим работу устройства с применением примесной проводимости полупроводников.

Пусть имеется два маленьких кристалла германия с примесями: один – трехвалентных атомов, другой – пятивалентных (рис. 5.43, а). Первый – это полупроводник  $p$ -типа, второй –  $n$ -типа. До соприкосновения основные и неосновные носители распределены равномерно по всему объему каждого кристалла. Концентрация неосновных носителей во много раз меньше концентрации основных носителей.

Приведем в контакт кристаллы. Тогда благодаря диффузии часть свободных электронов из полупроводника  $n$ -типа проникнет в полупроводник  $p$ -типа, занимая свободные места – дырки (рис. 5.43, б). При этом каждый раз исчезает пара свободный электрон – дырка и восстанавливается химическая связь. Такой процесс называется **рекомбинацией** (от лат. *combinare* – соединять). При этом, полупроводник  $p$ -типа заряжается отрицательно, а  $n$ -типа – положительно, в области контакта появляется электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии электронов. Наступает состояние равновесия. В этом состоянии вблизи контактной поверхности существует слой с малой концентрацией основных носителей, пониженной проводимостью. Поэтому его называют **запирающим слоем**. Область между полупроводниками с

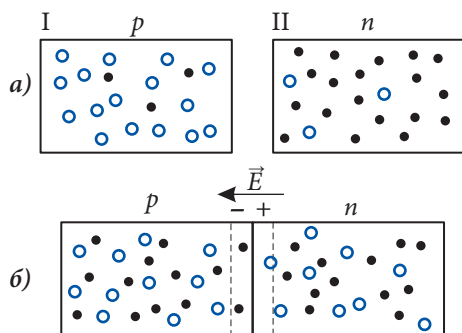


Рис. 5.43

примесями разной валентности называется ***p-n-переходом***.

Рассмотрим электрические свойства *p-n*-перехода. Включим полупроводник с *p-n*-переходом в электрическую цепь так, чтобы плюс источника тока был подсоединен к полупроводнику *p*-типа, а минус – к полупроводнику *n*-типа (рис. 5.44, а). Электроны из *n*-области начнут двигаться в сторону *p*-области, а дырки – из *p* в *n*. Концентрация свободных зарядов в области контакта увеличится, сопротивление перехода уменьшится. Такое направление внешнего электрического поля и электрического тока через *p-n*-переход называют **прямым**. С ростом приложенного напряжения сила тока растет. На вольтамперной характеристике (рис. 5.45) это ветвь графика с положительными значениями напряжения.

**Обратное** направление соответствует обратному подключению *p-n*-перехода к источнику тока, при котором основные носители оттягиваются от контакта (рис. 5.44, б). Запирающий слой, обедненный свободными носителями заряда, становится шире, его сопротивление растет. Обратный, очень слабый ток, создан неосновными носителями заряда. На рисунке 5.45 это ветвь с отрицательным напряжением.

Итак, через *p-n*-переход значительный ток проходит только в одном направлении. Это свойство перехода используется для выпрямления электрического тока в **полупроводниковых диодах**.

Условное изображение полупроводникового диода показано на рисунке 5.46. Направление стрелки совпадает с направлением прямого тока в диоде.

Диод состоит из пластинки кремния или германия, содержащей примесь пятивалентных атомов (полупроводник *n*-типа), в которую вплавляют каплю индия или другого трехвалентного элемента. Благодаря диффузии атомы индия проникают вглубь пластинки, создавая слой полупроводника *p*-типа. Остальная часть пластинки остается полупроводником *n*-типа (рис. 5.47). Так получают *p-n*-переход. Для защиты перехода от вредного внешнего воздействия его помещают в металлический или пластмассовый корпус.

На рисунке 5.48 показана схема из четырех диодов для выпрямления переменного тока (его направление меняется со временем). Видно, что направление тока в резисторе *R* одинаково при разной полярности напряжения на входе схемы.

На рисунке 5.48 показана схема из четырех диодов для выпрямления переменного тока (его направление меняется со временем). Видно, что направление тока в резисторе *R* одинаково при разной полярности напряжения на входе схемы.

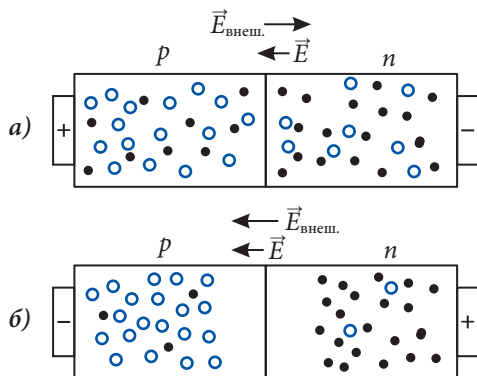


Рис. 5.44

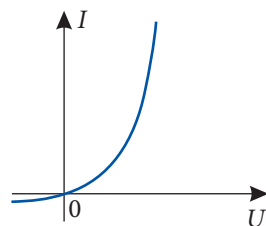


Рис. 5.45



Рис. 5.46

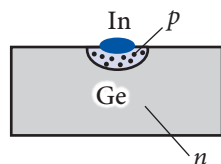


Рис. 5.47

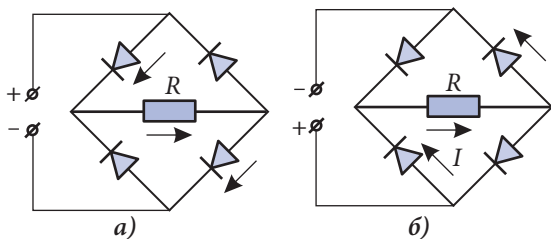


Рис. 5.48

## д. Транзистор

В конце 40-х годов XX века исследования в физике полупроводников привели к выдающемуся результату – американские ученые Дж. Бардин, У. Браттейн и У. Шокли изобрели **транзистор (полупроводниковый триод)**. Он представляет собой полупроводниковый кристалл, который содержит три области с примесной проводимостью: две  $n$ -типа и между ними одна  $p$ -типа или наоборот – две  $p$ -типа и между ними одна  $n$ -типа (рис. 5.49). На обеих сторонах пластины из германия или кремния с примесью малой концентрации пентавалентных атомов (полупроводник  $n$ -типа) вплавляют по капле индия или другого трехвалентного элемента. Диффундируя, трехвалентные атомы проникают в пластину, образуя в двух местах полупроводники  $p$ -типа. Получается кристалл с разной примесной проводимостью – транзистор  $p$ - $n$ - $p$  (рис. 5.49, а). Так же изготавливают транзистор  $n$ - $p$ - $n$ : на обеих сторонах пластины из полупроводника  $p$ -типа вплавляют по капле пентавалентного вещества, например, мышьяка (рис. 5.49, б).

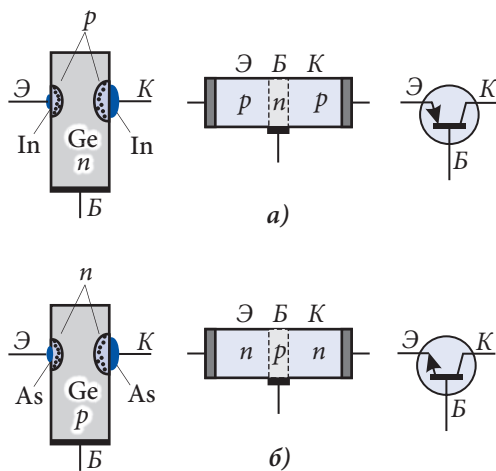


Рис. 5.49

На средней колонке рисунка 5.49 видно, что транзистор состоит из двух  $p$ - $n$ -переходов с противоположными пропускными направлениями. Расстояние между переходами мало (около 10 мкм), поэтому они влияют друг на друга. Среднюю область называют **базой (Б)**, а боковые – **эмиттер (Э)** и **коллектор (К)**. У транзистора три вывода – по одному от каждой области.

Чтобы знать на схемах тип транзистора в его условном обозначении переход эмиттер–база обозначают стрелкой. Она указывает пропускное направление  $p$ - $n$ -перехода. (см. правую колонку рис. 5.49).

Рассмотрим принцип работы  $n$ - $p$ - $n$  транзистора по схеме на рисунке 5.50. Она состоит из двух цепей: эмиттер – база (*цепь I*) и база – коллектор (*цепь II*). База – общий элемент двух цепей, поэтому такое подключение транзистора называют **подключением с общей базой**.

Вначале цепь эмиттера разомкнута.  $p$ - $n$ -переход в цепи коллектора подключен к источнику тока  $\mathcal{E}_2$  в обратном направлении. Ток в такой цепи создают неосновные носители, их концентрация очень мала, поэтому и сила тока очень мала. При замыкании ключа  $Кл$   $p$ - $n$ -переход в цепи эмиттера подключается к источнику тока  $\mathcal{E}_1$  в прямом направлении и в цепи эмиттера возникает созданный основными носителями большой ток. Электроны проводимости движутся от эмиттера к

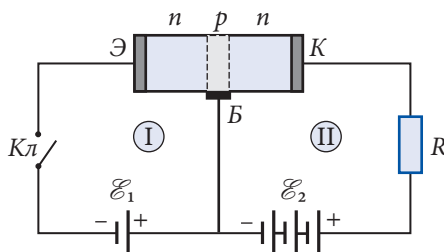


Рис. 5.50

базе. Толщина базы мала, поэтому большинство электронов проникает дальше, в коллектор. В цепи коллектора возникает ток, примерно равный току в эмиттере. Так как ЭДС  $\mathcal{E}_2$  и сопротивление  $R$  велики, то и напряжение на резисторе  $R$  будет большим.

Таким образом, небольшие изменения напряжения в цепи эмиттера создают значительные изменения напряжения в цепи коллектора. Если в цепи эмиттера напряжение изменяется со временем, то одновременно, но значительно сильнее изменяется и напряжение на резисторе в цепи коллектора. Так с помощью транзистора усиливаются электрические сигналы.

Способность транзистора усиливать сигналы, замыкать и размыкать электрические цепи нашла широкое применение в промышленности, научных исследованиях и в быту. Их применение позволило автоматизировать управление различными технологическими процессами, уменьшить размеры радиоэлектронной аппаратуры.

Изобретение полупроводниковых диодов и транзисторов позволило создать новые поколения более совершенных вычислительных машин (компьютеров).

Современные технологии позволяют создавать интегральные схемы – полупроводниковые кристаллы, содержащие огромное количество диодов, транзисторов, конденсаторов, резисторов и др. Размеры компьютера уменьшились до размеров школьного портфеля, что дало возможность использовать их в самых разных областях человеческой деятельности – от исследования космоса до учебного стола.

Исследование полупроводниковых материалов находится в центре внимания физиков Академии Наук и университетов Молдовы. Группа ученых под руководством академика Сергея Рэдэуцана (1926–1998) получила и изучила свойства ряда новых полупроводников. Под руководством и при участии академика Алексея Симашкевича (р. в 1929 г.) были разработаны оптоэлектронные устройства и солнечные батареи. В лаборатории академика Дмитрия Гицу (1931–2008) были изучены свойства полуметаллов, была разработана серия датчиков, сенсоров и других устройств, нашедших применение в промышленности. Группа исследователей под руководством академика Андрея Андриеша (1933–2012) получила и изучила полупроводниковые волокна с уникальными свойствами для оптической связи. Под руководством академика Валерия Канцера (р. в 1955 г.) была разработана технология получения и изучены материалы для регистрации, передачи и обработки информации в диапазоне инфракрасного излучения, были проведены исследования по восстановлению свойств твердых тел их структурированием на наноровне.

Важные исследования в теории твердого тела, в частности полупроводников, провели коллективы физиков под руководством академиков Святослава Москаленко (р. в 1928 г.) и Виктора Коварски (1929–2000).

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какие вещества называют полупроводниками?
2. Назовите свободные носители зарядов в полупроводниках.
3. Как зависит удельное сопротивление полупроводников от температуры? Как объясняется эта зависимость?

4. Что собой представляет фоторезистор? Как он работает? Где он применяется?
5. Чему равна валентность атомов примесей в кремниевом полупроводнике *n*-типа? Назовите основные и неосновные носители в полупроводнике *n*-типа.
6. Какие примеси называют акцепторными? Чему равна валентность соответствующих атомов? Назовите основные и неосновные носители в полупроводнике с акцепторными примесями.
7. Что вы знаете о концентрации электронов проводимости и дырок в полупроводниках с собственной проводимостью? Проводимостью *p*-типа? *n*-типа?
8. Как объясняется сильное влияние атомов примеси на удельное сопротивление полупроводников?
9. Что называют *p-n*-переходом? Как объясняется протекание тока через переход практически только в одном направлении?
10. Что надо изменить в схеме на рисунке 5.50 для замены *n-p-n* транзистора на транзистор *p-n-p*?
11. На рисунке 5.51 представлен способ подключения в цепь транзистора, называемый схемой с общим эмиттером. Проанализируйте и опишите усиление электрических сигналов на основе этой схемы.
12. Почему полупроводниковые диоды и транзисторы не могут работать при высоких температурах?

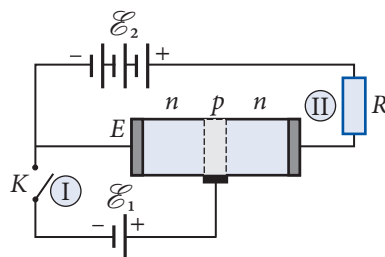


Рис. 5.51

## 5.7 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ

### а. Электролитическая диссоциация.

#### Носители электрического заряда в электролитах

Хорошо известен факт, что поваренная соль ( $\text{NaCl}$ ), а также дистиллированная вода являются изоляторами, т.е. не проводят электрический ток, однако водный раствор поваренной соли является проводящей средой.

**Электролитами** называются вещества – соли, кислоты, основания, растворы которых проводят электрический ток.

К электролитам относятся также расплавы веществ, если они в этом состоянии проводят электрический ток.

Механизм возникновения свободных носителей электрического заряда в электролитах известен из курса химии. В молекуле  $\text{NaCl}$  атом натрия отдает один электрон атому хлора, при этом образуются ионы  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . Взаимодействие этих ионов с молекулами воды ослабляет ионную связь между ними и вследствие теплового движения нейтральная молекула расщепляется на ионы. Часть молекул  $\text{NaCl}$  расщепляется в процессе растворения – кристалл покидают не только нейтральные молекулы, но и их части – ионы.

Процесс расщепления вещества на ионы противоположного знака называется **электролитической диссоциацией**.



В отсутствие внешнего электрического поля ионы хаотически движутся в растворе. При движении некоторые ионы противоположного знака сближаются до столь малых расстояний, что объединяются в нейтральные молекулы. Этот процесс называется **рекомбинацией**.

Таким образом, в электролитах одновременно происходят два процесса – диссоциация и рекомбинация. В первом из них нейтральные молекулы расщепляются на ионы противоположного знака, во втором, наоборот, ионы противоположного знака объединяются в нейтральные молекулы. В итоге между этими процессами устанавливается **динамическое равновесие**, в неизменных условиях концентрация ионов остается постоянной. При повышении температуры электролита тепловое хаотическое движение становится более интенсивным, динамическое равновесие наблюдается при более высокой концентрации ионов.

Таким образом, свободными носителями электрического заряда в электролитах являются ионы противоположного знака. **Электролиты – это вещества с ионной проводимостью.**

### 6.\* Электролиз. Законы Фарадея

Как в металлах, так и в полупроводниках, протекание электрического тока не сопровождается переносом вещества. Совершенно иной является ситуация в электролитах. При упорядоченном движении ионы переносят не только электрический заряд, но и определенную массу вещества.

Введем термины, необходимые для описания электрического тока в электролитах. Сосуд с электролитом, в который помещают два электрода, обычно угольных (рис. 5.52), называется **электролитической ванной**. Электрод, соединенный с положительным полюсом источника тока, называется **анодом**, а соединенный с отрицательным – **катодом**. Если между электродами приложено электрическое напряжение, то положительные ионы перемещаются к катоду и поэтому называются **катионами**, а отрицательные перемещаются к аноду и называются **анионами**.

Достигнув катода, положительные ионы получают электроны из внешней цепи и становятся нейтральными. Отрицательные ионы, достигнув анода, отдают во внешнюю цепь электроны. Нейтральные вещества, полученные таким способом, осаждаются на электродах, остаются в растворе или выделяются в виде пузырьков газа.

**Совокупность электрохимических процессов, которые происходят на электродах, помещенных в электролит, при прохождении через него электрического тока, называется электролизом.**

Впервые электролиз был обнаружен А. Карлейлем и У. Никольсоном. В 1880 году они опубликовали статью, в которой описали появление пузырьков газа возле электродов, помещенных в воду и соединенных с батареей Вольты (гальваническим элементом).

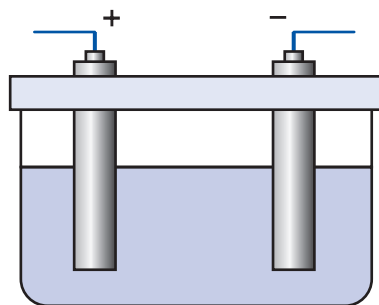


Рис. 5.52

Электролиз экспериментально был изучен М. Фарадеем, который установил соответствующие законы (1833).

Мы получим эти законы, исходя из современных представлений о структуре вещества.

Допустим, что за время электролиза катода достигли  $N$  положительных ионов. Обозначим через  $m_{oi}$  массу иона и через  $q_{oi}$  – его электрический заряд. Масса вещества, выделявшегося на катоде, равна  $m = Nm_{oi}$ , а заряд, перенесенный через электролит,  $q = Nq_{oi}$ . Взяв отношение этих величин, получим:

$$\frac{m}{q} = \frac{m_{oi}}{q_{oi}} = k. \quad (5.46)$$

Отношение массы иона к его заряду является величиной, постоянной для данного вещества, и называется **электрохимическим эквивалентом**  $k$ . Его единица

$$[k] = \text{кг/Кл}.$$

Из соотношения (5.46) запишем:

$$m = kq. \quad (5.47)$$

Масса вещества, выделившегося на электроде, прямо пропорциональна электрическому заряду, перенесенному через электролит (**первый закон Фарадея для электролиза**).

Из выражения (5.47) следует, что **электрохимический эквивалент численно равен массе вещества, выделившегося на электроде за время, в течение которого через электролит прошел заряд, равный 1 Кл.**

Для случая постоянного тока  $I$  заряд, прошедший через электролит,  $q = It$ . Формула (5.47) принимает вид, который обычно используется:

$$m = kIt. \quad (5.48)$$

Проанализируем выражение (5.46) для электрохимического эквивалента вещества. Масса одного иона  $m_{oi} = \frac{M}{N_A}$ , где  $M$  – это молярная масса вещества и  $N_A$  – число Авогадро. Электрический заряд иона  $q_{oi} = ne$ , где  $n$  – валентность и  $e$  – элементарный электрический заряд. Подставив эти величины в (5.46), для электрохимического эквивалента получим:

$$k = \frac{M}{N_A en}. \quad (5.49)$$

Величина

$$F = N_A e \quad (5.50)$$

представляет собой произведение двух универсальных постоянных, следовательно, также является универсальной постоянной. Она называется **постоянной** или **числом Фарадея**. Значение  $F = 96\,500$  Кл/моль.

Выражение (5.49) принимает вид:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}. \quad (5.51)$$

Отношение  $\frac{M}{n}$  называется **химическим эквивалентом**.

**Электрохимический эквивалент вещества прямо пропорционален его химическому эквиваленту (второй закон Фарадея для электролиза).**

Подставив (5.51) в (5.48), получим объединенный закон Фарадея для электролиза:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n} It. \quad (5.52)$$

Отметим, что законы электролиза были установлены экспериментально, таким же путем были определены значения химических эквивалентов и числа Фарадея.

Исследования в области электролиза оказались чрезвычайно важными для физики, так как привели к гипотезе о существовании в природе элементарного электрического заряда. В своих работах, относящихся к электролизу, Фарадей отмечал, что постоянство отношения массы выделившегося на электроде вещества к количеству электричества, прошедшего через электролит, наводит на мысль, что «атомы тел, эквивалентные по своему химическому действию, содержат равные количества электричества».

В 1881 г. Г. Гельмгольц писал, что в электролизе «... всегда одно и то же количество электричества перемещается вместе с одновалентным ионом, будучи неотделимым от него. Это количество электричества может быть названо зарядом иона. Если мы допускаем существование химических атомов, то мы вынуждены заключить отсюда далее, что так же и электричество, как положительное, так и отрицательное, разделяется на определенные количества, которые играют роль *атомов электричества*».

Из соотношений (5.50) и (5.52) выражаем элементарный электрический заряд:

$$e = \frac{MIt}{mN_A n}. \quad (5.53)$$

Для определения величины элементарного заряда нужно знать массу вещества  $m$ , выделившегося на электроде за время  $t$  при силе тока через электролит, равной  $I$ , молярную массу  $M$  вещества, валентность  $n$ , а также число Авогадро  $N_A$ . Впервые таким способом величину  $e$ , близкую к значению, принятому в настоящее время,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, получил Джордж Джонсон Стоней (1826–1911).

В 1891 году для этого количества электричества Стоней предложил название „электрон”. Позднее это название было принято для частицы, открытой Дж. Дж. Томсоном в 1897 году, электрический заряд которой  $q_e = -e$ .

## в. Применения электролиза

Явление электролиза имеет широкое практическое применение, главным образом для получения, очистки и переработки металлов, в связи с чем получили развитие ряд отраслей промышленности.

В основе **электрометаллургии** лежит процесс получения некоторых металлов путем электролиза расплавленных руд, например, алюминия из боксита, минерала, содержащего оксид алюминия и соединения серы. Чугунная электролитическая ванна имеет наклонное дно с отверстием для слива жидкого алюминия. В ванну загружают боксит и помещают графитовые электроды, служащие анодом. Дно ванны является катодом. Очень сильные токи, протекающие через минерал, нагревают его и расплавляют, в результате происходит электролитическая диссоциация молекул. Алюминий оседает на дно ванны и периодически стекает в специальные формы. Это один из самых дешевых методов получения алюминия. Электролизом получают также натрий, магний, бериллий и др.

Для *очистки* металлов применяется **электролитическое рафинирование**. Например, медь, выплавленная непосредственно из руды, содержит примеси, а для использования в электротехнике она должна быть как можно чище. С этой целью в электролитическую ванну, содержащую раствор серно-кислой меди, помещают анод из меди, выплавленной из руды, и катод из чистой меди. При электролизе ионы  $\text{Cu}^{2+}$  осаждаются на катоде, а анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ , взаимодействуя с атомами меди анода, образуют молекулы  $\text{CuSO}_4$ , переходящие в раствор, где диссоциируют. В результате, концентрация ионов в электролите остается постоянной, а атомы меди переходят с анода на катод, на котором выделяется чистая медь. Примеси выпадают на дно ванны. Подобным образом очищают и другие металлы.

**Гальваностегией** называется процесс покрытия поверхности тел (например, железных) тонким слоем металлов для защиты от коррозии и украшения. Такими металлами являются золото, серебро, никель, хром, медь и др. Покрываемый слой предмет служит катодом, а анодом является пластина из металла, которым требуется покрыть предмет, электролитом является раствор соли этого металла. При электролизе предмет покрывается слоем требуемого металла. В зависимости от металла процесс называется золочением, серебрением, никелированием, хромированием и т.д.

**Гальванопластика** – это электролитический способ изготовления форм для отливки рельефных копий предметов, например, статуэток. Изготавливается восковой слепок предмета, который покрывается тонким слоем графита, помещается в электролитическую ванну и служит катодом. В результате электролиза слепок покрывается слоем металла. Затем воск выплавляется. Форма для отливки готова. Она заполняется металлом, из которого изготавливается статуэтка, затем форма удаляется (разрезанная на несколько частей может быть использована для серийного производства статуэток).

С помощью электролиза получают важные химикаты, например каустическую соду и др.

### Пример решения задачи\*

<b>Дано:</b> $V = 150 \text{ см}^3$ , $p = 120 \text{ кПа}$ , $I = a - bt$ , $a = 10 \text{ А}$ , $b = \frac{1}{30} \frac{\text{А}}{\text{с}}$ , $k = 8,3 \cdot 10^{-8} \frac{\text{кг}}{\text{Г}} \frac{\text{К}}{\text{С}}$ , $M = 32 \frac{\text{кг}}{\text{МОЛЬ}}$	<b>СИ:</b> $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ , $1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$  $32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{МОЛЬ}}$
$T - ?$	К

Кислород, выделившийся при электролизе воды, аккумулирован в теплоизолированном сосуде объемом  $150 \text{ см}^3$  и имеет давление  $120 \text{ кПа}$ . Для электролиза использован ток, линейно убывающий со временем до исчезновения по закону  $I = a - bt$ , где  $a = 10 \text{ А}$ ,  $b = (1/30) \text{ (А/с)}$ . Определите температуру накопленного кислорода. Электрохимический эквивалент и молярная масса кислорода  $k = 8,3 \cdot 10^{-8} \text{ кг/Кл}$  и  $M = 32 \text{ г/моль}$ .

### Решение

Состояние аккумулированного кислорода описывается уравнением Клапейрона-Менделеева (1.30), из которого выражаем температуру:

$$T = \frac{pVM}{mR},$$

где  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная.

Согласно первому закону Фарадея для электролиза масса выделившегося кислорода пропорциональна электрическому заряду:

$$m = kq,$$

где  $k$  – электрохимический эквивалент кислорода.

Электрический заряд  $q$  численно равен площади фигуры под графиком зависимости силы тока от времени (рис. 5.53). Поскольку электролиз происходит до полного исчезновения тока ( $I = 0$ ), то точка пересечения с осью времени получается из уравнения  $a - bt$ , то есть  $t = a/b$ . Таким образом, заряд  $q$  численно равен площади треугольника на рисунке 5.53:

$$q = \frac{a^2}{2b}.$$

Для температуры получаем выражение:

$$T = \frac{pVM}{kqR} = \frac{2bMpV}{ka^2R}; T \approx 557 \text{ К.}$$

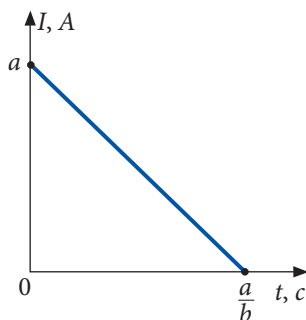


Рис. 5.53

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Какие вещества называются электролитами?
2. Что называется электролитической диссоциацией? В чем состоит обратное явление? Как оно называется?
3. Как зависит концентрация ионов электролита от температуры?
4. Как объясняется факт, что при неизменных условиях концентрация ионов остается постоянной? В чем состоит динамическое равновесие?
5. Как объясняется факт, что протекание тока через электролит сопровождается переносом вещества, а через металлы – нет?
6. Что имеют общего и чем отличаются собственная проводимость полупроводников и проводимость электролитов?
7. В чем состоит электролиз?
- 8.\* Будут ли одинаковы массы веществ, выделившихся на электродах, если через электролиты с разной концентрацией ионов этих веществ переносятся одинаковые количества электричества?
- 9.\* Каков физический смысл электрохимического эквивалента вещества?
10. Как производится очистка меди электролизом?
11. Что такое гальваностегия? Какие предметы домашнего обихода, обработанные этим способом, вы знаете?
- 12.\* Какое количество электричества прошло через электролит за время, в течение которого на катоде выделилось 1,7 г цинка? Электролитический эквивалент  $Zn$  равен  $3,4 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл.
- 13.\* Ученик провел эксперимент по определению электрохимического эквивалента меди. Электролиз сульфата меди ( $CuSO_4$ ) продолжался 30 мин при силе тока через электролит 2,5 А. Масса катода до эксперимента была равна 23,2 г, после – 24,7 г. Какое значение электрохимического эквивалента меди получил ученик?

14.\* Бронзовая статуэтка общей площадью поверхности  $60 \text{ см}^2$  помещена в качестве катода в электролитическую ванну, содержащую раствор азотнокислого серебра ( $\text{AgNO}_3$ ). Определите промежуток времени, за который статуэтка будет покрыта слоем серебра средней толщиной  $75 \text{ мкм}$ , если сила тока через электролит равна  $2 \text{ А}$ . Молярная масса серебра равна  $0,108 \text{ кг/моль}$ , плотность –  $10,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , серебро одновалентно.

## 5.8

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ГАЗАХ

#### а. Несамостоятельный электрический разряд

Хорошо известно, что газы в естественном состоянии не проводят электрический ток, т.е. являются изоляторами. Например, провода воздушной линии электропередачи не покрывают изолирующим слоем, так как между ними находится воздух. Он же служит диэлектриком в воздушных конденсаторах.

Однако, при определенных условиях, которые будут установлены далее, газы проводят электрический ток.

Протекание электрического тока через газы называется **электрическим разрядом**.

Мы знаем, что одним из условий существования электрического тока в какой-либо среде является наличие свободных носителей электрического заряда. Газы состоят из нейтральных атомов и молекул. Они содержат ничтожно малое число свободных электронов. Так, концентрация свободных электронов в воздухе при нормальных условиях примерно в  $10^{14}$  раз меньше, чем в металле, что может создать только предельно малый ток.

Проанализируем следующий опыт (рис. 5.54): два металлических диска при помощи проводников присоединены к электрометру, один – к шарик, другой – к корпусу. Диски заряжают зарядами противоположного знака (рис. 5.54, а). Замечаем, что в течение длительного времени отклонение стрелки электрометра не изменяется, что объясняется отсутствием электрического тока между дисками. При внесении в пространство между пластинами пламени спиртовки отклонение стрелки электрометра уменьшается (рис. 5.54, б), что может быть объяснено только протеканием тока между дисками. Следовательно, под действием пламени в воздухе появились свободные носители электрического заряда. Этот опыт можно провести, заменив пламя сильно нагретой металлической нитью. При высоких температурах скорости теплового движения молекул велики, при столкновениях некоторые из них теряют электрон и превращаются в положительные ионы. Этот процесс называется **ионизацией**, а фактор, ее вызывающий – **ионизатором**. Разумеется, для отрыва электрона от нейтральной молекулы необходима определенная энергия.

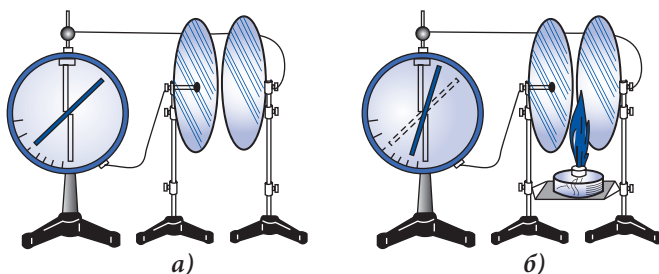


Рис. 5.54

Минимальная энергия, необходимая для отрыва электрона от нейтральной молекулы, называется **энергией ионизации** ( $W_0$ ).

Отметим, что некоторые электроны могут быть захвачены нейтральными молекулами, которые при этом превращаются в отрицательные ионы. Итак, **свободными носителями электрического заряда в газах являются: электроны, положительные и отрицательные ионы.**

Одновременно в ионизованных газах происходит процесс, обратный ионизации, – процесс **рекомбинации**, в котором положительный ион захватывает электрон и превращается в нейтральную молекулу. Если условия, в которых находится ионизованный газ, не изменяются с течением времени, то устанавливается динамическое равновесие между процессами ионизации и рекомбинации, а концентрации носителей заряда не изменяются с течением времени.

Как было показано, ионизация сопровождается поглощением энергии. При рекомбинации, наоборот, энергия выделяется, обычно в виде излучения.

Перечислим и другие ионизирующие факторы: свет, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения, потоки заряженных частиц, какими являются космические лучи (излучение, приходящее из космического пространства), радиоактивные частицы и др. Именно благодаря космическим лучам и земной радиоактивности атмосферный воздух содержит свободные электроны, что было отмечено выше.

Проанализируем зависимость силы электрического тока в газах от приложенного напряжения. Схема установки представлена на *рисунке 5.55*. Запаянная трубка  $T$  с двумя электродами – катодом  $K$  и анодом  $A$  – содержит исследуемый газ. Напряжение между электродами можно изменять с помощью потенциометра  $\Pi$ . Во время опыта действие ионизатора (на рисунке не показан) не изменяется, что обеспечивает образование постоянного числа носителей заряда за единицу времени.

При замыкании ключа  $Kл$  электроны и отрицательные ионы перемещаются к аноду, в положительные ионы – к катоду. Достигнув электродов, ионы отдают или получают электроны соответственно, превращаются в нейтральные молекулы и остаются в составе газа в трубке.

Допустим, что напряжение между электродами плавно увеличивается, начиная с нуля. Соответственно, возрастают скорости упорядоченного движения носителей заряда, растет сила тока. При низких напряжениях сила тока прямо пропорциональна напряжению ( $I \sim U$ ), то есть выполняется закон Ома (участок  $0A$ , *рис. 5.56*). При дальнейшем увеличении напряжения  $U$  наблюдается более медленный рост силы тока  $I$  (участок  $AB$ ), далее устанавливается постоянное значение силы тока  $I_n$ , называемого **током насыщения** (участок  $BC$ ). При этом ежесекундно электродов достигает такое число носителей, какое возникает ежесекундно за счет ионизатора.

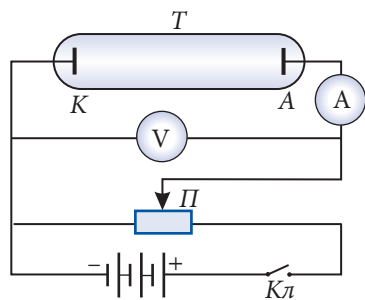


Рис. 5.55

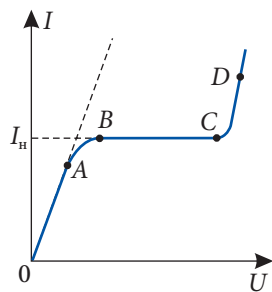


Рис. 5.56

Однако, если действие ионизатора прекращается, то носители, имеющиеся в трубке, достигают электродов, новые не возникают и разряд прекращается. Электрический разряд, происходящий только при действии ионизатора, называется **несамостоятельным электрическим разрядом**.

При дальнейшем увеличении напряжения между электродами в какой-то момент наблюдается резкое возрастание силы тока (участок  $CD$ , рис. 5.56). Это означает, что в перенос заряда включились новые носители. Объясним механизм их возникновения. В электрическом поле напряженностью  $\vec{E}$  на носители элементарного электрического заряда  $\pm e$  действует сила, модуль которой равен  $F_3 = eE$ . Обозначим через  $\lambda$  среднее расстояние, проходимое носителем заряда между двумя последовательными соударениями с другими частицами. На этом расстоянии электрическая сила совершает работу:

$$A = F_3 \lambda = eE\lambda. \quad (5.54)$$

Это максимальное значение работы, совершаемой при перемещении носителя заряда в направлении действия силы  $F_3$ , оно используется для оценки величин, характеризующих электрический заряд.

Расстояние  $\lambda_e$  между двумя последовательными столкновениями электронов гораздо больше, чем соответствующее расстояние  $\lambda_i$  для ионов, размеры которых больше и они чаще сталкиваются. Поэтому для электронов увеличение кинетической энергии между двумя последовательными столкновениями, равное работе (5.54), больше, чем для ионов. Таким образом, при напряжении  $U$  между электродами напряженность поля  $E$  приобретает значение, при котором увеличение кинетической энергии электрона достаточно для ионизации молекулы, т.е. равно энергии ионизации:

$$W_0 = eE\lambda_e. \quad (5.55)$$

В этих условиях электроны, ставшие свободными в результате действия внешнего ионизатора, при соударениях ионизируют молекулы. Этот процесс называется **ионизацией электронным ударом**.

Отметим одну существенную особенность данного вида ионизации. В результате соударения электрона с нейтральной молекулой и ее ионизации имеется уже два свободных электрона. Таким образом, после каждого последующего соударения их число удваивается: 4, 8, 16... Образуется **лавина электронов**, которая нарастает до тех пор, пока не достигнет анода (рис. 5.57).

После прекращения действия ионизатора лавина электронов достигает анода, положительные ионы – катода. В отсутствие новых электронов и ионов разряд прекращается. В этих условиях разряд самостоятельный.

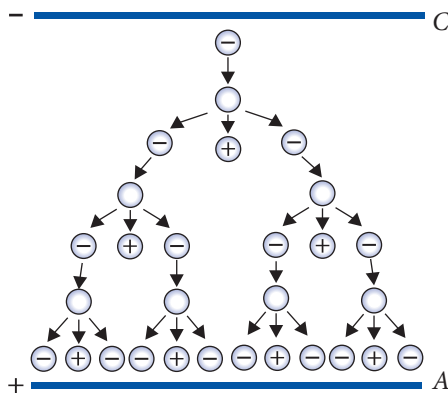


Рис. 5.57



## 6. Самостоятельный газовый разряд. Применения

При дальнейшем увеличении напряжения  $U$  между электродами напряженность  $E$  достигает значения, при котором работа электрического поля обеспечивает увеличение кинетической энергии ионов (между двумя последовательными соударениями), достаточное для ионизации молекулы при соударении, то есть выполняется условие:

$$W_0 = eE\lambda_i. \quad (5.56)$$

Положительные ионы, ударяясь о катод, выбивают из него электроны. Ускоряясь, они производят ионизацию электронным ударом, их число нарастает лавинообразно. Электрический разряд продолжается и после прекращения действия внешнего ионизатора, он становится самостоятельным. Таким образом, условие (5.56) есть условие перехода от несамостоятельного разряда к **самостоятельному разряду**.

Существует несколько видов самостоятельного разряда в зависимости от способа, при котором удовлетворяется условие (5.56), содержащее два фактора:  $E$  и  $\lambda_i$ .

При малых давлениях расстояния между молекулами больше, чем при нормальном атмосферном давлении, соответственно и расстояние  $\lambda_i$ , проходимое ионами между двумя последовательными соударениями, больше. Переход от несамостоятельного разряда к самостоятельному происходит при меньших напряженностях электрического поля  $E$ . Самостоятельный разряд при малых давлениях называется **тлеющим разрядом**. Так как концентрация свободных электронов и ионов велика, то рекомбинация происходит интенсивно. В результате возникает свечение, цвет которого зависит от природы газа.

Тлеющий разряд широко применяется в рекламе. Широко используются газосветные трубки, имеющие форму букв или каких-либо фигур. На их концах монтируются электроды. Трубки обычно заполняют инертным газом. При тлеющем разряде трубки излучают свет: неоновые – красного цвета, аргоновые – сине-зеленого.

Этот же вид разряда происходит и в люминесцентных трубках, используемых для освещения. Разряд происходит в парах ртути и сопровождается ультрафиолетовым излучением, которое поглощается слоем специального вещества, покрывающего изнутри стенки трубки. Под действием ультрафиолетового излучения вещество испускает свет, гораздо более близкий по составу к дневному, чем свет обычных ламп накаливания, поэтому *люминесцентные трубки* называют **лампами дневного света**. Кроме того, они более экономичны, чем лампы накаливания. Они называются также **экологическими лампами** (рис. 5.58).

Тлеющий разряд происходит и в газовых лазерах.

Среди самостоятельных разрядов, происходящих при атмосферном давлении, наиболее известен **искровой разряд**. Если установить шарики электростатической машины на расстоянии порядка 2–3 см, то при вращении ее ручки между шариками возникает электрическая искра, сопровождаемая треском. Искра представляет собой светящийся канал, соединяющий оба электрода (шарики). Канал имеет вид ломаной линии сложной формы с

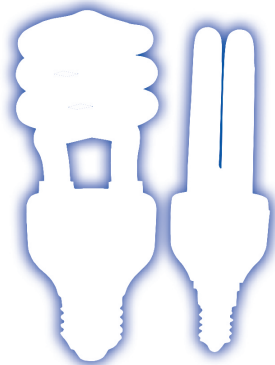


Рис. 5.58

многочисленными ответвлениями (рис. 5.59). Молния и гром – это пример искрового разряда, наблюдаемого в атмосфере. Его параметры впечатляющи: главный канал имеет диаметр порядка 10–25 см



Рис. 5.59

и длину до десятков километров, сила тока достигает сотен тысяч ампер при напряжениях около 20–100 миллионов вольт. Температура в канале достигает величин порядка десяти тысяч кельвин, что приводит к резкому изменению давления, возбуждая ударную звуковую волну, воспринимаемую как гром.

Если искровой разряд происходит при малых расстояниях между электродами, то ускоренные электроны, ударяясь о анод, повреждают его поверхность. Это явление лежит в основе метода электроискровой обработки поверхности металлов. Важные результаты в этой области были получены в Институте прикладной физики Академии наук Молдовы научной школой электроэрозионной обработки металлов, основанной академиком Борисом Лазаренко (1910–1979). Были разработаны новые технологии осаждения металлических покрытий.

В сильно неоднородном электрическом поле, например, вблизи металлического острия или тонкого заряженного проводника, наблюдается **коронный разряд**. Если напряженность электрического поля в этой области достигает величин порядка  $3 \cdot 10^6$  В/м, то в ней происходит ионизация электронными ударами. При удалении от этой области к другому электроду напряженность поля уменьшается и ионизация ударами не происходит. Ионизация и рекомбинация происходят в ограниченной области пространства, вблизи острия. Эта область светится благодаря рекомбинации и свечение имеет форму короны, что подтверждает название коронного разряда.

Коронный разряд наблюдается и в природе. Перед грозой или во время нее над верхушками высоких предметов, таких как деревья или мачты кораблей, находящихся среди моря и др., возникают светящиеся короны. Они известны под названием *огни Святого Эльма*.

Другим видом самостоятельного разряда, широко используемым в практике, является **дуговой разряд**. Два электрода (из прессованного графита или металлические), присоединенные к источнику тока, приводят в соприкосновение. Сопротивление в области контакта велико, поэтому выделяется большое количество теплоты. Разогретый до высокой температуры катод испускает электроны (см. п. 5.9, а). Воздух между электродами становится сильно ионизованным, его сопротивление уменьшается. Если раздвинуть электроды на небольшое расстояние, то при сравнительно небольшом напряжении сила тока будет велика. Электроны, бомбардируя анод, образуют в нем углубление – *кратер* – область с самой высокой температурой. При атмосферном давлении она достигает значений около 4 000 К, а при высоких давлениях становится выше температуры Солнца (приблизительно 6 000 К).

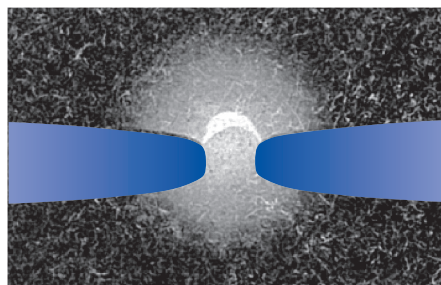


Рис. 5.60

Столб газа между электродами является мощным источником света, имеющим форму дуги (рис. 5.60), поэтому разряд и называется **дуговым**. Отмеченные особенности дугового разряда определили его практическое применение: в качестве источника света мощных проекторов, для сварки и резки металлов, для плавки руды в электропечах и др.

## в.\* Плазма

Как было отмечено, электрический разряд происходит в ионизованном газе, при этом плотность положительных и отрицательных зарядов одинакова, так что в целом ионизованный газ нейтрален. Такое состояние вещества называется **плазмой**.

Плазма считается **четвертым состоянием вещества**. Таким образом, в порядке возрастания температуры вещество существует в следующих состояниях: **твердое** → **жидкое** → **газообразное** → **плазма**. По своим свойствам плазма близка к газам, к ней применимы некоторые газовые законы. Однако, есть и существенные отличия. В газах молекулы нейтральны и связь между ними слаба. Заряженные частицы, входящие в плазму – ионы, электроны – взаимодействуют с силами, имеющими большой радиус действия (по сравнению с радиусами частиц), что обуславливает специфические свойства плазмы: в ней могут возбуждаться различные колебания и распространяться волны, поведение плазмы в электрических и магнитных полях свойственно только ей.

Отметим, что плазма – самое распространенное состояние во Вселенной: в этом состоянии находится около 99% вещества. Звезды, Солнце, галактические туманности находятся в плазменном состоянии. Земля также окружена плазмой: верхний слой атмосферы – **ионосфера** – образован ионизованным газом.

Плазма нашла важное практическое применение. Плазменные струи с температурой порядка  $10^3$ - $10^4$ К применяются для обработки металлов и сплавов, для перфорации тугоплавких изделий, в некоторых генераторах электрической энергии.

Обширные исследования ведутся в области высокотемпературной плазмы (порядка миллионов К) с целью ее использования для осуществления управляемых термоядерных реакций, лежащих в основе получения неиссякаемых источников энергии.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

1. Назовите свободные носители электрического заряда в газах.
2. Чем отличается ионизация газов от электролитической диссоциации?
3. Что называется несамостоятельным разрядом?
4. Выполняется ли закон Ома в газовом разряде?
5. Как можно изменить величину силы тока насыщения?
6. Что представляет собой ионизация электронным ударом и в каких условиях она происходит?
7. Чем отличается самостоятельный разряд в газах от несамостоятельного?
8. При каких условиях несамостоятельный разряд переходит в самостоятельный?

9. Чем объясняется, что самостоятельный разряд в газах сопровождается излучением света?
10. Какие применения тлеющего разряда известны вам?
11. В каких условиях происходит коронный разряд? Почему свет излучается в ограниченной области вблизи электрода с заостренным концом?
- 12.\* Что такое плазма?

## 5.9

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ

### а. Термоэлектронная эмиссия. Вакуумный диод. Триод

Американский изобретатель Томас Альва Эдисон (1847–1931), сконструировавший лампу накаливания, более совершенную, чем его предшественники, и которую широко стали использовать как источник света, в 1894 году исследовал случаи потемнения внутренней поверхности лампы при ее длительной эксплуатации. Он поместил в вакуумированную колбу не только нить накаливания, но и электрод в виде пластины (рис. 5.61), и установил, что при соединении этого электрода с положительным полюсом, а раскаленной нити – с отрицательным полюсом источника – в этой цепи течет электрический ток, даже если электроды – пластина и нить – не находятся в контакте. Таким образом, впервые был обнаружен электрический ток в вакууме. В то время ни Эдисон, ни другие физики не могли объяснить это явление, что стало возможным только после открытия электрона в 1897 году.



Рис. 5.61

При комнатной температуре электроны удерживаются внутри металла благодаря действию сил притяжения со стороны положительных ионов. Для извлечения электронов из металла наружу необходимо совершить работу по преодолению этих сил, называемую **работой выхода**. При нагревании металла средняя кинетическая энергия электронов увеличивается. Некоторые из них приобретают энергию, большую, чем работа выхода, и покидают металл. Чем выше температура, тем больше электронов выйдет наружу. Это явление называется **термоэлектронной эмиссией** или **эффектом Эдисона**, в результате чего в вакууме появляются носители электрического заряда, а значит, может течь электрический ток.

Термоэлектронная эмиссия в некотором смысле подобна испарению жидкости. Молекулы с кинетической энергией, превышающей среднюю, покидают жидкость, число таких молекул тем больше, чем выше температура. В открытом сосуде они все дальше удаляются от жидкости. Электроны имеют отрицательный заряд, при их выходе из металла последний заряжается положительно. Поэтому электроны, покинувшие металл, удерживаются вблизи него, образуя **электронное облако**. Это облако препятствует выходу других электронов из металла. Некоторые электроны из облака, двигаясь хаотически, возвращаются в металл, другие выходят, таким образом устанавливается динамическое равновесие между этими категориями электронов.

При более высокой температуре равновесие устанавливается при более высокой концентрации электронов в облаке.

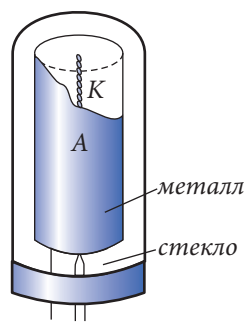
Электрические свойства усовершенствованной лампы Эдисона были изучены английским инженером Амброзом Флемингом (1849–1945), который в 1904 году запатентовал вакуумный диод. Он представляет собой откачанный баллон с двумя электродами. Один из них – анод  $A$  – представляет собой металлический цилиндр, второй – катод  $K$  – нить, расположенную вдоль общей оси анода и баллона (рис. 5.62, а). Графический символ показан на рисунке 5.62, б. Катод нить – подключен к специальному источнику тока, который нагревает его до температур порядка  $1000^\circ\text{C}$ , так что вокруг него образуется электронное облако. Допустим, что анод присоединен к положительному полюсу источника тока, а катод – к отрицательному. В этом случае потенциал анода больше, чем катода ( $\varphi_A > \varphi_K$ ), **напряжение называется прямым**. Электроны из облака притягиваются к аноду и отталкиваются от катода – через диод течет электрический ток. Однако, если мы подключим наоборот ( $\varphi_A < \varphi_K$ ), катод – к положительному полюсу источника, а анод – к отрицательному, то анод отталкивает электроны, а катод их притягивает.

В результате, ток через диод не течет. Таким образом, **ток через диод течет только в одном направлении**, как через полупроводниковый диод.

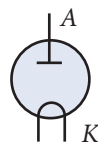
Проанализируем зависимость силы тока через диод от напряжения между электродами. Отметим, что при напряжении, равном нулю, через диод течет небольшой ток – электроны из облака с самыми большими скоростями достигают анода. Ток уменьшается до нуля при увеличении обратного, отрицательного напряжения, при котором потенциал катода больше, чем анода (рис. 5.62).

При увеличении от нуля прямого, положительного напряжения, все большее число электронов достигают анода, концентрация электронов в облаке уменьшается, что облегчает термоэлектронную эмиссию. В результате, при возрастании напряжения сила тока растет быстрее, чем прямо пропорционально, закон Ома не выполняется. При дальнейшем возрастании напряжения сила тока перестает увеличиваться, достигая постоянного значения  $I_n$  – силы тока насыщения (рис. 5.63). Величина  $I_n$  зависит от температуры катода, становясь больше при более высоких температурах.

Нагревание катода рассматриваемого диода происходит благодаря протеканию через него электрического тока. Затем был изобретен диод с катодом специальной конструкции: нить помещается внутрь тонкой изолированной трубки, на поверхность которой осажден слой оксида бария, кальция, стронция. У этих оксидов работа выхода меньше, чем у нити, диод работает при более низких температурах нити. У диодов с



а)



б)

Рис. 5.62

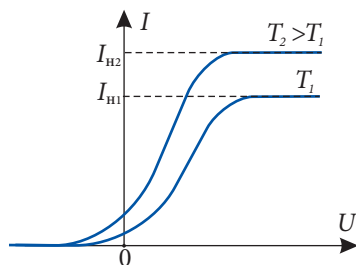


Рис. 5.63

оксидными катодами отсутствует горизонтальный участок на графике зависимости силы тока от приложенного напряжения (рис. 5.63). Катод разрушается прежде, чем ток достигает насыщения. Графический символ диода с оксидным катодом показан на рисунке 5.64.

Далее был сконструирован **триод** – откачанная колба с тремя электродами (графический символ показан на рис. 5.65). Третий электрод – сетка С (спираль или тонкая металлическая сетка) – расположен между катодом и анодом, вблизи катода. При потенциале сетки  $\varphi_C$ , большем, чем потенциал катода  $\varphi_K$ , электроны, находящиеся в облаке вблизи катода, ускоряются, что обуславливает существенное увеличение тока через триод. В противном случае, при  $\varphi_C < \varphi_K$ , электроны тормозятся в пространстве катод–сетка, сила тока через триод уменьшается. Таким образом, незначительное изменение потенциала сетки позволяет значительно изменять силу тока через триод, усиливать электрические сигналы.

Позднее были сконструированы вакуумные лампы с большим числом электродов, имеющие разнообразное практическое применение.

Из изложенного выше заключаем, что вакуумные диод и триод с одной стороны, и полупроводниковые диод и транзистор, с другой стороны, имеют похожие электрические свойства. Вакуумные лампы были изобретены в начале XX века и легли в основу развития радиоэлектроники. Изобретение транзистора в середине XX века привело к постепенной замене вакуумных ламп соответствующими полупроводниковыми элементами. Это привело в существенному уменьшению размеров многих используемых в электронике приборов. Полупроводниковым элементам не нужно энергии для нагревания катода, они в целом потребляют меньше энергии, чем вакуумные лампы. Последние, однако, не были вытеснены окончательно. Они встречаются в установках, в которых текут большие токи, разрушающие полупроводниковые элементы, например, в передатчиках радиотелевизионных центров, центров управления космическими полетами и др.

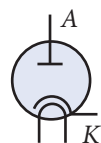


Рис. 5.64

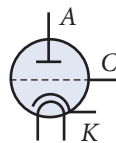


Рис. 5.65

## 6.\* Электронно-лучевая трубка

В 1869 году немецкий физик Иоганн Вильгельм Гитторф (1824–1914) изучал тлеющий разряд в разреженных газах. Трубка с электродами была соединена с насосом, откачивающим газ из трубки. Было замечено, что при очень низких давлениях характерное свечение газа в трубке исчезает, взамен начинают светиться некоторые части стенок трубки. Десять лет спустя английский физик Уильям Крукс (1832–1919) продолжил исследования Гитторфа и установил, что в случае электрического разряда при очень низких давлениях катод испускает особое излучение, названное **катодными лучами**. Были выявлены свойства этих лучей: они оказывают механическое действие (давление на тела, на которые падают) и тепловое (тела, на которые они падают, нагреваются); их торможение металлическими телами, на которые они падают, сопровождается излучением рентгеновских лучей; падение катодных лучей на флуоресцентные поверхности, например, сернистый цинк, сопровождается свечением соответствующих мест; катодные лучи отклоняются электрическими и магнитными полями.

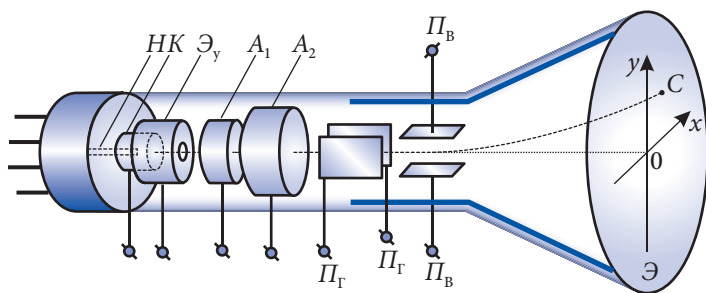


Рис. 5.66

Физическая природа катодных лучей была выяснена только после открытия в 1897 году электрона Дж. Дж. Томсоном. Было установлено, что **катодные лучи – это пучок электронов**, испускаемый катодом.

Важную роль в радиоэлектронике играют **вакуумированные трубки и пучки электронов**. Они позволяют превращать электрические сигналы в видимое изображение в телевизорах (в этом случае трубка называется **кинескоп**), в мониторах компьютеров, в осциллографе (соответствующая трубка называется **осциллоскоп**).

Принципиальная схема электронно-лучевой трубки представлена на рисунке 5.66. Нить  $H$  при прохождении через нее тока излучает энергию и нагревает оксидный катод  $K$ , который испускает электроны. Катод  $K$  находится внутри управляющего электрода  $\mathcal{E}$ , потенциал которого меньше потенциала катода. В электрическом поле, существующем между этим электродом и катодом, пучок электронов, испускаемый катодом, сужается. Изменяя потенциал электрода  $\mathcal{E}$ , можно изменять число электронов в пучке, т.е. его интенсивность. Аноды  $A_1$  и  $A_2$ , особой конфигурации, имеют потенциалы, большие, чем потенциал катода ( $\varphi_K < \varphi_{A1} < \varphi_{A2}$ ), что позволяет как ускорять электроны, так и фокусировать их в определенной точке экрана  $\mathcal{E}$  трубки. Описанная система – нить, катод, управляющий электрод и аноды – образует пучок электронов большой скорости и называется **электронной пушкой**.

Внутренняя поверхность экрана покрыта слоем флуоресцентного вещества. В месте падения пучка электрона появляется **светящееся пятно  $C$** .

Для управления пучком электронов, т.е. для изменения положения светящегося пятна  $C$  на экране  $\mathcal{E}$ , трубка содержит две пары отклоняющих пластин,  $\Pi_B$  и  $\Pi_G$ , через которые проходит пучок. Если потенциал верхней пластины пары  $\Pi_B$  больше, чем нижней, то пучок, а значит, и светящееся пятно перемещается вертикально вверх, в положительном направлении оси  $Oy$ , в противном случае – вертикально вниз. Соответственно, при изменении напряжения между отклоняющими пластинами  $\Pi_G$  пучок электронов перемещается в горизонтальном направлении. Перемещаясь по экрану в обоих направлениях, светящееся пятно различной интенсивности образует видимое изображение, передаваемое электрическими сигналами.

Электронно-лучевая трубка, предназначенная для получения черно-белого изображения, имеет только одну электронную пушку, а флуоресцентное вещество на экране испускает свет, близкий к дневному (белому свету). Трубки, предназначенные для получения цветного изображения, имеют три электронные пушки, соответственно,

три пучка для трех дополнительных цветов: зеленого, красного и голубого. Структура экрана гораздо более сложная и содержит вещества, генерирующие перечисленные цвета.

Трубка, предназначенная для превращения видимого изображения в электрические сигналы, называется **иконоскопом**. Это тоже вакуумированная трубка, но конструкция ее отлична от описанной выше. Успехи электроники вакуумированных трубок очевидны: достаточно только напомнить передачу на Землю цветного изображения пейзажей планет Марс, Нептун и др.

## ПРОВЕРЬТЕ СВОИ ЗНАНИЯ

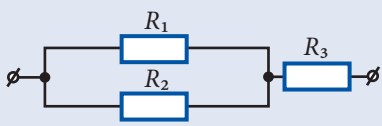
1. В чем состоит явление термоэлектронной эмиссии?
2. Что называется работой выхода электрона?
3. Как объясняется наличие электронного облака вблизи нагретого катода?
4. Что такое вакуумный диод? Почему электрический ток течет в нем только в одном направлении?
5. Как объясняется вид кривой зависимости силы тока через вакуумный диод от напряжения между электродами?
6. Как можно изменить величину силы тока насыщения?
7. Какие функции выполняет триод? Почему сетка располагается вблизи катода?
- 8.\* Какими свойствами обладают катодные лучи?
- 9.\* Какие функции выполняет электронно-лучевая трубка?
- 10.\* Из каких частей состоит электронная пушка и для чего предназначена каждая из них?
- 11.\* Как появляется светящееся пятно на экране электронно-лучевой трубки? Как оно может перемещаться?



# ТЕСТЫ ДЛЯ ИТОГОВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАНИЙ

## РЕАЛЬНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	<b>Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:</b>			
	а) Постоянный электрический ток существует в проводнике, если ... отлично от нуля.		1 б.	
	б) При ... соединении резисторов отношение сил токов в них обратно пропорционально их сопротивлениям.		1 б.	
	в) Электрический разряд в газах, происходящий только в присутствии ... называется самостоятельным.		1 б.	
2	<b>Покажите (с помощью стрелок) соответствие между следующими физическими величинами и их единицами:</b>			
	электрический заряд	•	• Ом/м	1 б.
	сила тока	•	• Ом · м	1 б.
	электрическое сопротивление	•	• А	1 б.
	удельное электрическое сопротивление	•	• А · с • В/А	1 б.
3	<b>Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно:</b>			
	а) Электрический ток называют постоянным, если его направление не меняется со временем.	<input type="checkbox"/>	1 б.	
	б) Электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника за определенное время, равен отношению силы тока в проводнике к этому промежутку времени.	<input type="checkbox"/>	1 б.	
	в) Электролитическая диссоциация происходит при протекании электрического тока через электролит.	<input type="checkbox"/>	1 б.	
	Задания 4 и 5 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).			
4	<b>Полный электрический заряд донорного полупроводника отрицателен, так как этот полупроводник представляет собой четырехвалентный кристалл, в который введены пентавалентные атомы.</b>			
	<b>Ответ:</b>		3 б.	
	утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .			
5	<b>Шунт подключается параллельно амперметру, так как при параллельном соединении сила тока в амперметре составляет только часть силы тока в цепи.</b>			
	<b>Ответ:</b>		3 б.	
	утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .			

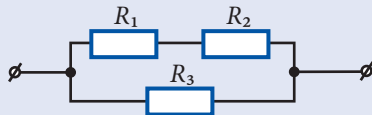
6	На катоде электролитической ванны, через которую течет электрический ток 1,5 А, за 50 мин выделилось 4,65 г олова. Определите:	
	а) электрохимический эквивалент олова;	2 б.
	б) промежуток времени, за который на катоде выделится 8,37 г олова при силе тока через ванну, равной 7,5 А.	2 б.
7	Три резистора с сопротивлениями $R_1 = 3 \text{ Ом}$ , $R_2 = 6 \text{ Ом}$ и $R_3 = 4 \text{ Ом}$ соединены согласно схеме на рисунке. Найдите:	
		
	а) эквивалентное сопротивление участка цепи;	2 б.
	б) силу тока в резисторах 2 и 3, если сила тока в резисторе 1 равна $I_1 = 3 \text{ А}$ ;	3 б.
	в) электрическое напряжение, приложенное к участку цепи.	2 б.
8	Если к источнику постоянного тока подключен потребитель с сопротивлением $R_1 = 11 \text{ Ом}$ , то развиваемая в нем мощность $P_1 = 99 \text{ Вт}$ , а если подключить потребитель с сопротивлением $R_2 = 17 \text{ Ом}$ , то развиваемая мощность $P_2 = 68 \text{ Вт}$ . Определите:	
	а) электродвижущую силу источника тока;	4 б.
	б) внутреннее сопротивление источника тока;	2 б.
	в) коэффициент полезного действия цепи в обоих случаях.	3 б.

## ГУМАНИТАРНЫЙ ПРОФИЛЬ

1	Заполните свободные места так, чтобы следующие высказывания были верны:			
	а)	Электрический ток представляет собой ... движение носителей ... заряда.		1 б.
	б)	Вне источника тока положительные электрические заряды движутся от ... полюса источника тока к ..., а внутри источника тока – от ... к ... полюсу.		1 б.
	в)	Процесс расщепления молекул вещества на ... называется электролитической диссоциацией.		1 б.
2	Покажите (с помощью стрелок) соответствие между следующими физическими величинами и их единицами:			
	электрический заряд	•	• Ом	1 б.
	сила тока	•	• А · с	1 б.
	электрическое сопротивление	•	• В	1 б.
	удельное электрическое сопротивление	•	• Ом · м • А	1 б.
3	Определите степень истинности каждого из следующих утверждений, записывая „И“, если утверждение истинно, и „Л“, если утверждение ложно:			
	а)	При отсутствии внешнего электрического поля свободные электрические заряды в проводнике движутся как хаотично, так и упорядоченно.	<input type="checkbox"/>	1 б.
	б)	Сопротивление однородного проводника постоянного сечения прямо пропорционально длине и площади поперечного сечения.	<input type="checkbox"/>	1 б.
	в)	Электронная проводимость примесных полупроводников называется собственной.	<input type="checkbox"/>	1 б.
Задания 4 и 5 состоят из двух утверждений, соединенных между собой союзом <b>так как</b> . Установите, истинно (записывая <b>И</b> ) или ложно (записывая <b>Л</b> ) каждое из утверждений, и есть ли между ними <b>причинно-следственная</b> связь (записывая <b>да</b> или <b>нет</b> ).				
4	Сила тока численно равна электрическому заряду, прошедшему через поперечное сечение проводника в единицу времени, так как сопротивление проводника равно отношению напряжения на концах проводника к силе тока в нем.			
	Ответ:			3 б.
утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .				
5	Сопротивление проводника зависит только от его геометрических размеров, так как проводники – это вещества, содержащие свободные носители электрических зарядов.			
	Ответ:			3 б.
утверждение 1 – <input type="checkbox"/> ; утверждение 2 – <input type="checkbox"/> ; <b>причинно-следственная</b> связь – <input type="checkbox"/> .				
6	Через поперечное сечение проводника за 20 с прошел электрический заряд в 12 Кл. Найдите:			

	а) промежуток времени, за который через поперечное сечение проводника пройдет заряд в 15 Кл;	2 б.
	б) силу тока в проводнике.	2 б.

**7** В изображенной ниже схеме известны сопротивления:  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 9 \text{ Ом}$  и  $R_3 = 6 \text{ Ом}$ . Определите:



	а) эквивалентное сопротивление соединения резисторов;	2 б.
	б) силу тока в резисторе $R_3$ , если в резисторе $R_2$ сила тока равна 0,7 А.	3 б.

**8** К зажимам источника тока с ЭДС 4,5 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом подсоединен резистор с сопротивлением 8,8 Ом. Вычислите:

	а) силу тока в цепи;	3 б.
	б) количество теплоты, выделяемое в резисторе за 2 минуты.	2 б.

# ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

## Глава I. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

- 1.2 9. 44; 0,044 кг/моль; 10.  $2,7 \cdot 10^{-26}$  кг; 11.  $6,7 \cdot 10^{22}$ ,  $6 \cdot 10^{21}$ ;  
12.  $5,4 \cdot 10^{21}$ ; 13.  $1,97 \cdot 10^{25}$ ; 14. 7,3 кг; 15.  $1,9 \cdot 10^{19}$  с<sup>-1</sup>; 16. 5,9 нм.
- 1.5 4. 1 581 м/с; 5.  $2,26 \cdot 10^{17}$ ; 6. 300 Дж; 7. 0,4 МПа; 8. 0,4 мН.
- 1.6 6.  $-40^\circ\text{C} = -40^\circ\text{F}$ , 574,25 К = 574,25 °F; 7. 35 °C.
- 1.7 4.  $2,65 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>; 5. 2 000 К; 6. 0,028 кг/моль; 7. 4,17 кг/м<sup>3</sup>.
- 1.8 11. 10 м; 12.  $10^5$  Па; 13. 30 кПа; 14. 10 м<sup>3</sup>; 15. 30 см; 16. 300 К;  
17. 1 МПа; 18. 500 К; 19. 10 кг; 21.  $2,57 \cdot 10^5$  Па; 22. 660 К;  
24. 289 К; 25. 1 кг/м<sup>3</sup>; 26.  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/моль, гелий;  
27. 8,31 кПа, 24,93 кПа; 28. 0,6 кг/м<sup>3</sup>.

## Глава II. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

- 2.1 6. -210 Дж; 7. -520 Дж; 8. 199,4 Дж; 9. 7 л.
- 2.2 5. 60 кДж (в процессе 1а2) и 30 кДж (в процессе 1б2); 6. 225 кДж.
- 2.3 6. 73 °C; 7.  $m_1c_1 + m_2c_2$ .
- 2.4 6. 140 Дж; 7. 1 500 Дж; 8.  $3,5 \cdot 10^5$  Па; 9. 6 кДж, 15 кДж; 10. 360 К;  
11.  $M = 0,032$  кг/моль, кислород.
- 2.5 7. 23 %; 8. 960 Дж; 9. 300 %; 10. 1 160 Дж.
- 2.6 8. 60 %; 9. 470 К; 10. 190 кДж; 11. 490 К.

## Глава III. ЖИДКОСТИ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

- 3.2 8. 50 мкДж; 9. 0,125 мДж; 10. 0,022 Н/м; 11. 180 мм.
- 3.4 8.  $5 \cdot 10^{-4}$ ; 9. а)  $10^7$  Па, б)  $1,4 \cdot 10^{-4}$ , в) 0,28 мм.
- 3.5 7. 200,072 см<sup>3</sup>; 8. 2,5 %; 9. 353 °C.

- 3.6 12. 0,0104 кг/м<sup>3</sup>; 13. 42 %; 14. 8,5 °С; 15. 6,5 кг; 16. 2,68 МДж.  
 3.7 9.  $\approx 1\,060$  м/с; 10.  $\approx 400$  К.  
 3.8 4. 24 °С; 5. 892,5 Дж/(кг · К); 6. 2 140 Дж/(кг · К); 7. 250 Дж/(кг · К);  
 8. 1,01 кг.

## Глава IV. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

- 4.1 2. Уменьшилось на  $3,2 \cdot 10^{-6}$  кг; 3.  $-0,8$  мкКл; 4.  $q_A = q_B = +0,6$  мкКл, шарик В передал шару А  $7,5 \cdot 10^{12}$  электронов; 7. 1,5 мН;  
 8. 2,5 мН; 9.  $2,1 \cdot 10^{-7}$  Кл.  
 4.2 4. 14 мН; 5. 625 Н/Кл; 6.  $5 \cdot 10^4$  Н/Кл; 7. На расстояние 5 см от заряда  $q$  на отрезке между зарядами.  
 4.3 5. 4,5 мДж; 6. 430 В; 7.  $4,2 \cdot 10^6$  м/с; 8.  $3\sqrt{2}$  кВ; 9. 60 В;  
 10. Положительный заряд в два раза больше модуля отрицательного заряда; 11.  $5,9 \cdot 10^6$  м/с.  
 4.5 3. 0,02 м; 4. 0,162 м; 5. 2,1; 6.  $3,2 \cdot 10^{-3}$  Н.  
 4.6 7. 70 нФ; 8. 1 215 пФ; 9. 129 В; 10. 280 пФ, 56 нКл; 11. 150 В; 12. 2 нФ, 3 нФ; 13. 2,2 мкФ, параллельно; 14. 6,67 мкФ, в обоих случаях; 15. 240 пФ; 16. 1,08 мкКл; 5,4 В; 3,6 В; 17. 48 пФ.  
 4.7 3. Увеличилось в 9 раз; 4. 40 В; 5. а) Увеличивается в 2 раза; б) Уменьшается в 2 раза; 6.  $+4,5 \cdot 10^{-7}$  Дж; 7. 2,88 мкДж; 4,80 мкДж;  
 8.  $4 \cdot 10^{-7}$  Дж; 9. 103 Дж/м<sup>3</sup>.  
 4.8 2.  $4U_0$ ; 3. Кинетические энергии равны,  $v_1/v_2 = \sqrt{m_2/m_1}$ ; 5.  $3,4 \cdot 10^5$  м/с,  $1,5 \cdot 10^{-2}$  м; 6. 1,44 см,  $3,74 \cdot 10^5$  м/с; 7.  $2,96 \cdot 10^7$  м/с.

## Глава V. ЭЛЕКТРОКИНЕТИКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

- 5.1 7. 7,5 Кл; 8. 1,2 А; 9. 18 Кл; 1,5 А;  
 10. В узел поступает ток 0,5 А; 11. 7,5 Кл, 10 Кл.  
 5.2 11. 0,6 А; 25 Ом; 12. 60 м; 13. 4,2 Ом; 3,2 Ом; 14. 9 кДж;  
 15. 4 А; 16. 3 Ом; 0,75 Вт; 75 %.  
 5.3 5.  $R_A/R_{ш} = 14$ ; 6. 0,002 Ом; 7. В 10 раз.  
 5.5 9.  $5 \cdot 10^{-14}$  с; 10.  $3,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $4,8 \cdot 10^{-8}$  Ом·м; 11. 2 530 °С.  
 5.7 12.  $5 \cdot 10^3$  Кл; 13.  $3,3 \cdot 10^{-7}$  кг/Кл; 14. 35 мин.

**Manualul acesta este proprietatea  
Ministerului Educației al Republicii Moldova**

*Liceul* \_\_\_\_\_

*Manualul nr.* \_\_\_\_\_

Nr. crt.	Numele și prenumele elevului	Anul școlar	Aspectul manualului	
			la primire	la restituire
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				

- Dirigintele controlează dacă numele elevului este scris corect.
- Elevul nu trebuie să facă nici un fel de însemnări în manual.
- Aspectul manualului (la primire și la restituire) se va aprecia folosind termenii: *nou, bun, satisfăcător, nesatisfăcător*.

---

Imprimare la Tipografia „BALACRON” SRL,  
str. Calea Ieșilor, 10; MD-2069  
Chișinău, Republica Moldova  
Comanda nr. 549