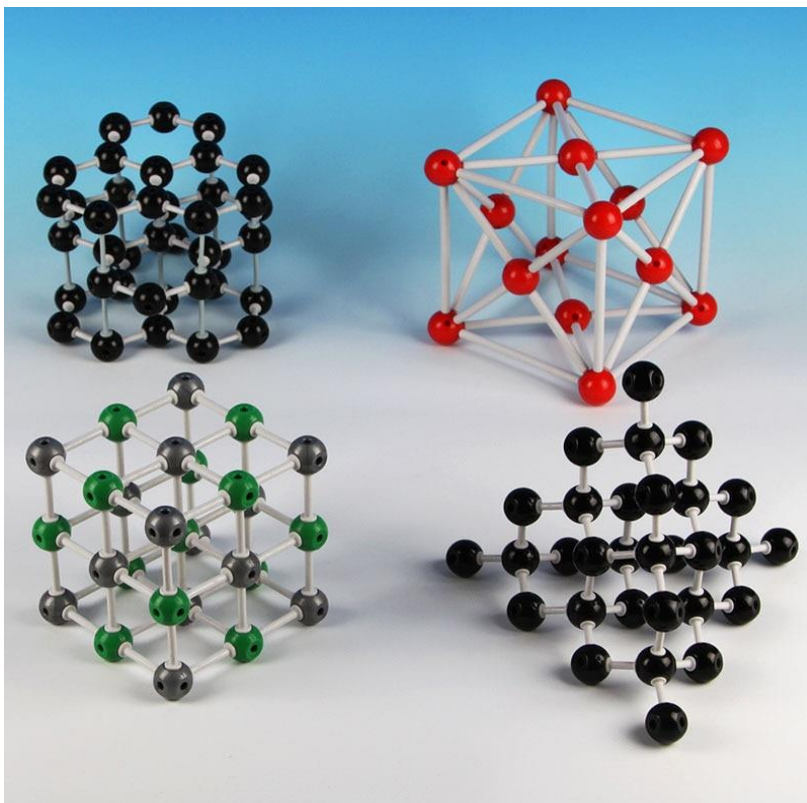


# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Учебно-практическое пособие



Челябинск  
2023

МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГУМАНИТАРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Учебно-практическое пособие

Челябинск

2023

**УДК 53(075)**

**ББК 22.3я72**

**М 75**

Молекулярная физика: учебно-практическое пособие / сост. Е.А. Селезнева; Министерство просвещения Российской Федерации, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет. – Челябинск: Изд-во ЮУрГГПУ, 2023. – 114 с. – ISBN 978-5-907790-39-1. – Текст: непосредственный.

В пособии подробно рассмотрены изучаемые в курсе физики темы раздела «Молекулярная физика». Каждая тема включает краткие теоретические сведения, примеры решения задач, а также разноуровневые задания для самостоятельной работы.

Курс построен в соответствии с требованиями стандарта ФГОС СПО и отражает содержание рабочей программы учебной дисциплины «Естествознание. Физика».

Пособие предназначено для студентов педагогических колледжей, обучающихся по направлениям подготовки «Преподавание в начальных классах», «Дошкольное образование», «Специальное дошкольное образование», «Физическая культура», изучающих дисциплину в рамках основной образовательной программы на базе основного общего образования.

Рецензенты:

М.Д. Даммер, д-р пед. наук, профессор кафедры ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ»

Н.В. Андриевских, канд. пед. наук, учитель высшей категории МАОУ «СОШ № 104 с углубленным изучением отдельных предметов г. Челябинска»

ISBN978-5-907790-39-1

© Селезнева Е.А., составление, 2023

© Издательство Южно-Уральского государственного  
гуманитарно-педагогического университета, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА .....	9
Основные положения молекулярно-кинетической теории .....	9
Основные понятия и формулы молекулярно- кинетической теории .....	13
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа .....	16
Энергия частиц и температура газа .....	17
Абсолютная температурная шкала .....	19
Проверочная работа .....	23
Уравнение Менделеева – Клайперона .....	23
Газовые законы .....	25
Закон Дальтона .....	31
ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ .....	34
Внутренняя энергия одноатомного идеального газа ..	35
Изменение внутренней энергии .....	36
Количество теплоты .....	42
Уравнение теплового баланса .....	44
АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА .....	50
Газы .....	50
Твердые тела .....	51
Жидкости .....	52
Фазовые переходы .....	54
Динамическое равновесие .....	61
Влажность воздуха .....	67
Капиллярные явления .....	70
Поверхностное натяжение и смачивание .....	72

Вопросы для устного зачета по теме «Тепловые явления» .....	75
ТЕРМОДИНАМИКА .....	78
Основы термодинамики .....	80
Второй закон термодинамики .....	83
Физические основы работы тепловых двигателей. КПД теплового двигателя .....	84
ИТОГОВАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА .....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	94
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	95
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	96
Приложение 1. Универсальные физические постоянные .....	96
Приложение 2. Соотношения между единицами .....	97
Приложение 3. Периодическая система химических элементов Д.И. Менделеева .....	99
Приложение 4. Табличные значения некоторых величин .....	100
Приложение 5. Темы сообщений по физике .....	102
Приложение 6. Требования к оформлению различных видов самостоятельной работы .....	103
Приложение 7. Критерии оценивания письменных работ .....	113

## ВВЕДЕНИЕ

В системе естественно-научного образования физика как учебный предмет занимает важное место в формировании научного мировоззрения и ознакомления обучающихся с методами научного познания окружающего мира, а также с физическими основами современного производства и бытового технического окружения человека; в формировании собственной позиции по отношению к физической информации, полученной из разных источников. Успешность изучения предмета связана с овладением основами учебно-исследовательской деятельности, применением полученных знаний при решении практических и теоретических задач.

Программа учебной дисциплины «Естествознание. Физика» предназначена для изучения естествознания в организациях среднего профессионального образования, реализующих образовательную программу среднего общего образования, при подготовке квалифицированных рабочих и специалистов среднего звена. Физика изучается как общеобразовательная дисциплина.

В процессе изучения раздела физики «Молекулярная физика и термодинамика» базового уровня ученик научится: демонстрировать на примерах роль и место физики в формировании современной научной картины мира, в развитии современной техники и технологий, в практической деятельности людей; учитывать границы применения изученных физических моделей: идеальный газ, модели строения газов, жидкостей и твердых тел; распознавать физиче-

ские явления (процессы) и объяснять их на основе законов молекулярно-кинетической теории строения вещества: диффузию, броуновское движение, строение жидкостей и твёрдых тел, изменение объёма тел при нагревании (охлаждении), тепловое равновесие, испарение, конденсацию, плавление, кристаллизацию, кипение, влажность воздуха, повышение давления газа при его нагревании в закрытом сосуде, связь между параметрами состояния газа в изопроцессах; при описании правильно трактовать физический смысл используемых величин, их обозначения и единицы, находить формулы, связывающие данную физическую величину с другими величинами; описывать изученные тепловые свойства тел и тепловые явления, используя физические величины: давление газа, температуру, среднюю кинетическую энергию хаотического движения молекул, среднеквадратичную скорость молекул, количество теплоты, внутреннюю энергию, работу газа, коэффициент полезного действия теплового двигателя; при описании правильно трактовать физический смысл используемых величин, их обозначения и единицы, находить формулы, связывающие данную физическую величину с другими величинами; анализировать физические процессы и явления, используя физические законы и принципы: молекулярно-кинетическую теорию строения вещества, газовые законы, связь средней кинетической энергии теплового движения молекул с абсолютной температурой, первый закон термодинамики; объяснять основные принципы действия машин, приборов и технических устройств; различать условия их безопасного использования в повседневной жизни; выполнять эксперименты по исследованию физических явлений и процессов с использованием прямых и косвенных измерений: при этом



формулировать проблему/задачу и гипотезу учебного эксперимента; собирать установку из предложенного оборудования; проводить опыт и формулировать выводы; — осуществлять прямые и косвенные измерения физических величин; при этом выбирать оптимальный способ измерения и использовать известные методы оценки погрешностей измерений; — исследовать зависимости между физическими величинами с использованием прямых измерений: при этом конструировать установку, фиксировать результаты полученной зависимости физических величин в виде таблиц и графиков, делать выводы по результатам исследования; — соблюдать правила безопасного труда при проведении исследований в рамках учебного эксперимента, учебно-исследовательской и проектной деятельности с использованием измерительных устройств и лабораторного оборудования; решать расчётные задачи с явно заданной физической моделью, используя физические законы и принципы; на основе анализа условия задачи выбирать физическую модель, выделять физические величины и формулы, необходимые для её решения, проводить расчёты и оценивать реальность полученного значения физической величины; — решать качественные задачи: выстраивать логически непротиворечивую цепочку рассуждений с опорой на изученные законы, закономерности и физические явления; использовать при решении учебных задач современные информационные технологии для поиска, структурирования, интерпретации и представления учебной и научно-популярной информации, полученной из различных источников; критически анализировать получаемую информацию; приводить примеры вклада российских и зарубежных учёных-физиков в развитие науки, объяснение процессов окружаю-

щего мира, в развитие техники и технологий; использовать теоретические знания по физике в повседневной жизни для обеспечения безопасности при обращении с приборами и техническими устройствами, для сохранения здоровья и соблюдения норм экологического поведения в окружающей среде.

Данное пособие содержит теоретический материал, задания для практических работ, указания по организации и выполнению самостоятельной работы по разделу «Молекулярная физика» дисциплины «Естествознание. Физика». Задания разработаны на основе примерной основной образовательной программы среднего общего образования с учетом требований ФГОС СПО.

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## Основные положения молекулярно-кинетической теории

**Молекулярная физика** — это раздел физики, изучающий строение и свойства вещества в различных агрегатных состояниях на основе молекулярно-кинетических представлений.

Основные положения **молекулярно-кинетической теории** (МКТ) состоят в следующем:

1) любое вещество состоит из молекул — наименьших устойчивых частиц данного вещества, обладающих всеми его химическими свойствами;

2) все молекулы находятся в состоянии непрерывного хаотического движения, характер которого зависит от агрегатного состояния вещества;

3) между молекулами действуют силы притяжения и отталкивания.

Множество прямых и косвенных доказательств реальности молекул позволяет считать молекулярно-кинетические представления о строении вещества абсолютно достоверными. Основные положения молекулярно-кинетической теории подтверждаются многочисленными опытами с использованием достижений современной экспериментальной техники. С помощью ионного проектора получают изображения кристаллов, по которым можно представить их строение. Электронные микроскопы позволили получить изображения кристаллов, по которым оказалось возможным определение расстояний между отдельными атомами и молекулами. Одним из важнейших прямых доказательств справедливости молекулярно-кинетической теории газов

являются измерения значений скоростей молекул газов и сравнение этих результатов со значениями, полученными на основании теории [10].

**Броуновское движение.** Большое значение в обосновании молекулярно-кинетической теории имело открытие английского ботаника Р. Броуна. В 1827 году он обнаружил беспорядочное движение видимых в микроскоп частиц цветочной пыльцы, взвешенных в воде (названо впоследствии *броуновским движением*). Объяснить броуновское движение и его закономерности смогла лишь молекулярно-кинетическая теория.

В доказательство того, что это движение совершается вечно, Броун нашел кусок кварца с полостью, заполненной водой. Несмотря на то, что вода попала туда много миллионов лет назад, оказавшиеся там соринки продолжали свое движение, которое ничем не отличалось от того, что наблюдалось в других опытах [1].

Причиной броуновского движения является тепловое движение молекул среды и отсутствие точной компенсации ударов, испытываемых частицей со стороны окружающих ее молекул.

Причина броуновского движения заключается в том, что взвешенная частица испытывает некомпенсированные удары со стороны молекул жидкости (газа), причем в силу хаотичности движения молекул величина и направление результирующего воздействия абсолютно непредсказуемы [6]. Поэтому броуновская частица описывает сложные зигзагообразные траектории (рис. 1).

Размеры броуновских частиц в 1 000–10 000 раз превышают размер атома. С одной стороны, броуновская частица достаточно мала и пока еще «чувствует», что в разных направлениях по ней бьет различное количество молекул; это различие в числе ударов приводит к заметным переме-

щениям броуновской частицы. С другой стороны, броуновские частицы достаточно велики для того, чтобы их можно было разглядеть в микроскоп. Кстати говоря, броуновское движение может рассматриваться и как доказательство самого факта существования молекул, то есть также может служить опытным обоснованием первого положения МКТ.

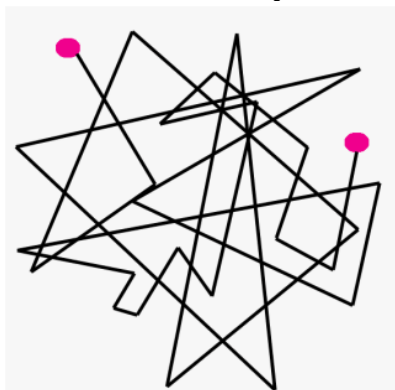


Рис. 1. Броуновское движение

Третье положение МКТ говорит о взаимодействии частиц вещества: *атомы или молекулы взаимодействуют друг с другом силами притяжения и отталкивания, которые зависят от расстояний между частицами: при увеличении расстояний начинают преобладать силы притяжения, при уменьшении – силы отталкивания.* О справедливости третьего положения МКТ свидетельствуют силы упругости, возникающие при деформациях тел. При растяжении тела увеличиваются расстояния между его частицами, и начинают преобладать силы притяжения частиц друг к другу. При сжатии тела расстояния между частицами уменьшаются, и в результате преобладают силы отталкивания. В обоих случаях упругая сила направлена в сторону, противоположную деформации.

Другим подтверждением существования сил межмолекулярного взаимодействия служит наличие трех агрегатных состояний вещества.

В газах молекулы удалены друг от друга на расстояния, значительно превышающие размеры самих молекул (в воздухе при нормальных условиях примерно в 1 000 раз). На таких расстояниях силы взаимодействия между молекулами практически отсутствуют, поэтому газы занимают весь предоставленный им объем и легко сжимаются.

В жидкостях промежутки между молекулами сравнимы с размерами молекул. Силы молекулярного притяжения весьма ощутимы и обеспечивают сохранение жидкостями объема. Но для сохранения жидкостями формы эти силы недостаточно велики. Вследствие этого, жидкости, как и газы, принимают форму сосуда.

В твердых телах силы притяжения между частицами очень велики: твердые тела сохраняют не только объем, но и форму.

Переход вещества из одного агрегатного состояния в другое является результатом изменения величины сил взаимодействия между частицами вещества. Сами частицы остаются при этом неизменными.

**Диффузия** — взаимное проникновение молекул одного вещества в промежутки между молекулами другого вещества (рис. 2).

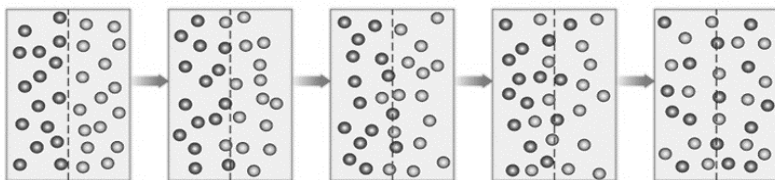


Рис. 2. Схема процесса диффузии

### **Вопросы для самоконтроля**

1. В каких агрегатных состояниях возможна диффузия?
2. Чем отличается процесс диффузии в разных состояниях?
3. От чего зависит скорость протекания процесса перемешивания?
4. Приведите примеры диффузии в быту.
5. Обоснуйте пользу и вред от диффузии.

### **Задание для самостоятельной работы**

Составьте опорный конспект по теме «Строение газов, жидкостей и твердых тел» (возможно оформление в виде таблицы).

В ходе выполнения задания рекомендуется отразить следующее: сохранение формы; сохранение объема; заполнение предоставленного объема; расположение молекул; движение (скорость) молекул; схему расположения молекул; силы взаимодействия между молекулами; примеры веществ в агрегатном состоянии.

### **Основные понятия и формулы молекулярно-кинетической теории**

**Один моль** — это количество вещества, в котором содержится столько же структурных единиц (молекул или атомов), сколько атомов содержится в углероде  $^{12}\text{C}$  массой 12 г.

В одном моле любого вещества содержится одно и то же число структурных единиц, из которых оно состоит. Это число называют *постоянной Авогадро*  $N_A$ . Постоянная Авогадро равна

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

**Молярной массой  $M$**  называется величина, равная отношению массы вещества  $m$  к количеству вещества  $\nu$ :

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

**Плотность** вещества (масса единицы объема) есть отношение массы вещества к занимаемому им объему:

$$\rho = \frac{m}{V}.$$

**Концентрация** вещества показывает число частиц в единице объема:

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

### Основные формулы

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА	
$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M}$	количество вещества
$M = m_0 \cdot N_A$	молярная масса
$m_0 = \frac{M}{N_A} = \frac{m}{N}$	масса одной молекулы
$m = \nu \cdot M = \rho \cdot V$	масса вещества
$N = N_A \frac{m}{M} = \nu \cdot N_A$	число молекул
$\rho = \frac{m}{V} = n \cdot m_0$	плотность
$n = \frac{N}{V} = \frac{\rho}{m_0}$	концентрация



### **Задачи для самостоятельного решения**

1. Капля масла объемом  $0,003 \text{ мм}^3$  растеклась по поверхности воды тонким слоем и заняла площадь  $300 \text{ см}^2$ . Определите диаметр молекул. Считайте, что толщина слоя равна диаметру молекулы.

2. Для получения смеси воды и спирта объемом  $100 \text{ см}^3$  необходим спирт объемом  $10 \text{ см}^3$  и вода объемом  $90,7 \text{ см}^3$ . Почему объем смеси меньше объема составляющих ее компонентов?

3. Вычислите массу молекулы кислорода.

4. Сколько молекул содержится в воде объемом 1 литр?

5. В сосуде находится  $5,418 \cdot 10^{26}$  молекул кислорода. Определите массу кислорода и количество вещества в этом сосуде.

6. В сосуде находится азот. Количество вещества равно 200 моль. Определите массу азота.

7. Сколько молекул находится в стакане воды, если масса воды равна 200 г?

8. Плотность некоторого газа при нормальных условиях равна  $2,5 \text{ кг/м}^3$ . Найдите молярную массу этого вещества. Определите, что это за газ.

9. Молярная масса азота  $0,028 \text{ кг/моль}$ . Чему равна масса молекулы азота?

10. Плотность вещества  $2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , масса одной молекулы  $5 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ . Чему равна концентрация молекул в нем?

11. Определите число атомов в  $1 \text{ м}^3$  меди. Молярная масса меди  $0,0635 \text{ кг/моль}$ , плотность  $8900 \text{ кг/м}^3$ .

12. Плотность алмаза  $3500 \text{ кг/м}^3$ . Какой объем займут  $10^{22}$  атомов этого вещества?

13. Определите число молекул в стакане воды вместимостью  $100 \text{ см}^3$ .

14. За сутки из сосуда испарилось 20 г воды. Определите, сколько молекул вылетело с поверхности воды за 1 с.

15. Масса молекул  $N = 25 \cdot 10^{27}$  некоторого газа равна 1 кг. Определите, какой это газ.

### ***Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа***

На основании многочисленных экспериментов установлено очень важное свойство тепловых явлений: тело или система тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние теплового равновесия. *Тепловым или термодинамическим равновесием* называют такое состояние, при котором все макроскопические параметры системы сколь угодно долго остаются постоянными. Это означает, что не меняются объем и давление, не происходит теплообмен (передача энергии) между частями системы, отсутствуют взаимные превращения газов, жидкостей, твердых тел и т.д. Но микроскопические процессы (движение молекул, их столкновения, обмен скоростями) в системе не прекращаются и при тепловом равновесии.

Физический параметр, одинаковый во всех частях системы тел, находящихся в состоянии теплового равновесия, называется *температурой*. Если при контакте двух тел никакие их физические параметры не изменяются, то между телами нет теплообмена и температура тел одинакова.

Для объяснения свойств вещества в газообразном состоянии используется модель *идеального газа*. В этой модели предполагается, что молекулы обладают пренебрежимо малым объемом по сравнению с объемом сосуда, между молекулами не действуют силы притяжения, при соударениях молекул друг с другом и со стенками сосуда действуют силы упругого отталкивания [4].

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа было выведено на основе предположения о том, что молекулы газа при столкновениях со стенками сосуда взаимодействуют с ними по законам механики как упругие тела. Согласно этому уравнению

$$p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \bar{v}^2.$$

### **Энергия частиц и температура газа**

При установлении теплового равновесия между двумя газами выравниваются средние кинетические энергии их частиц. Известно, что при этом становятся равны и температуры газов. Следовательно, *температура газа — это мера средней кинетической энергии его частиц*, т.е. средняя кинетическая энергия его молекул. Определенная таким образом температура измеряется в энергетических единицах — джоулях (Дж). Но для практических задач удобнее иметь дело с привычными кельвинами. Связь средней кинетической энергии частиц и абсолютной температуры газа выражена формулой:

$$E = \frac{3}{2} kT,$$

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

Из данной формулы можно получить выражение для средней квадратической скорости частиц. Подставим полученное выражение в известную формулу кинетической энергии:

$$\frac{m_0 \cdot \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

получим

$$v = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}.$$

В эту формулу входит масса частицы  $m_0$ , которую нужно вычислить. Но можно получить более удобный вариант формулы, умножив числитель и знаменатель подкоренного выражения на число Авогадро  $N_A$ .

В знаменателе имеем:

$$m_0 N_A = M.$$

В числителе стоит произведение двух констант, которое также является константой:

$$R = k \cdot N_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 8,31 \text{ Дж / (моль} \cdot \text{К)}.$$

Константа  $R$  называется *универсальной газовой постоянной*.

Теперь формула для средней квадратической скорости приобретает вид:

$$v = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Такое выражение гораздо более удобно для практических вычислений. Среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул газа  $\bar{E}$  можно вычислить по формуле:

$$\bar{E} = \frac{m_0 \cdot \bar{v}^2}{2}.$$

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории** можно записать в эквивалентной форме

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

Из трех агрегатных состояний вещества наиболее простым для изучения является газообразное. В достаточно разреженных газах расстояния между молекулами намного больше размеров самих молекул [2].

Поэтому силы взаимодействия между молекулами таких газов очень малы.

Для описания разреженных газов в физике используется модель идеального газа. В рамках этой модели делаются следующие допущения.

1. Размеры молекул не учитываются. Молекулы газа считаются материальными точками.

2. Взаимодействие молекул на расстоянии не учитывается.

3. Соударения молекул друг с другом и со стенками сосуда считаются абсолютно упругими.

Таким образом, *идеальный газ – это газ, частицы которого являются не взаимодействующими на расстоянии материальными точками и испытывают абсолютно упругие соударения друг с другом и со стенками сосуда.*

### Абсолютная температурная шкала

Абсолютная температура  $T$  связана с температурой  $t$  по шкале Цельсия соотношением:

$$T = t + 273 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Это можно представить графически (рис. 3).

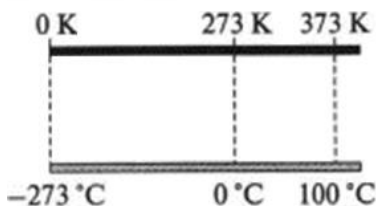


Рис. 3. Соотношение между температурными шкалами (Цельсия и Кельвина)

Единицы температуры чаще всего устанавливаются следующим образом. Покажем это на примере *шкалы Цельсия*. Фиксируются две температуры (так называемые *реперные точки*) — температура таяния льда и температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Первой температуре приписывается значение 0, второй — значение 100, а интервал между ними делится на 100 равных частей. Каждая из частей называется *градусом* (обозначают °C), а полученная таким образом температурная шкала — *шкалой Цельсия*.

При измерениях по шкале Цельсия с помощью жидкостных термометров возникает одна трудность: разные жидкости при изменении температуры изменяют свой объем по-разному. Поэтому два термометра с различными жидкостями, приведенные в тепловой контакт с одним и тем же телом, могут показать разные температуры. От данного недостатка свободны идеально-газовые термометры — зависимость давления разреженного газа от температуры не зависит от вещества самого газа [3].

Для температурной шкалы идеально-газового термометра существует естественное начало отсчета: это та предельно низкая температура, при которой давление идеального газа постоянного объема обращается в нуль. Эта температура называется *абсолютным нулем температур*. Температурная шкала, началом отсчета которой является абсолютный нуль, а единицей температуры — градус Цельсия, называется *абсолютной температурной шкалой*.

Температура, измеряемая по абсолютной шкале, называется *абсолютной температурой* и обозначается буквой *T*. Единица абсолютной температуры называется *кельвином* (K).

Абсолютному нулю ( $T = 0$ ) соответствует температура  $t = -273,15$  С. Поэтому связь абсолютной температуры и температуры по шкале Цельсия может быть выражена соотношением:

$$T = t + 273,15$$

В задачах достаточно использовать формулу  $T = t + 273$ .

**Задание.** Подготовить сообщение о различных температурных шкалах (Цельсия, Фаренгейта, Кельвина и др.). В докладе необходимо отразить: кратко биографию ученого, именем которого названа шкала; особенности создания шкалы (что взято за реперные точки шкалы, какое вещество); удобна ли она в применении; используется ли сейчас; правило перевода градусов рассмотренной шкалы в градусы шкалы Цельсия.

### **Основные формулы**

ИДЕАЛЬНЫЙ ГАЗ	
$p = \frac{1}{3} n \cdot m_0 \cdot \bar{v}^2$	основное уравнение МКТ идеального газа
$p = \frac{2}{3} n \cdot \bar{E}$	
$p = n \cdot k \cdot T$	
$\bar{E} = \frac{m_0 \cdot \bar{v}^2}{2}$	средняя кинетическая энергия движения молекул
$\bar{E} = \frac{3}{2} k \cdot T$	
$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$	средняя квадратичная скорость движения молекул

### ***Задачи для самостоятельного решения***

16. Рассчитайте давление, которое производят молекулы газа на стенки сосуда, если масса газа 3 г, объем 0,5 л, средняя квадратичная скорость молекул 500 м/с.

17. Определите, при какой температуре средняя квадратичная скорость движения молекул водорода равна 500 м/с.

18. Какова средняя квадратичная скорость движения молекул гелия при температуре 22 °С?

19. При какой температуре средняя квадратичная скорость движения молекул азота равна второй космической скорости для Земли?

20. Сколько молекул содержится в 2 г газа при давлении 150 кПа и температуре 27 °С ?

21. Чему равна концентрация молекул кислорода, если давление его равно 0,2 МПа, а средняя квадратичная скорость движения молекул составляет 700 м/с?

22. При какой температуре средняя квадратичная скорость движения молекул азота равна 943 м/с?

23. Определите при давлении 200 кПа среднюю квадратичную скорость движения молекул газа, который занимает объем 5 м<sup>3</sup> и имеет массу 6 кг.

24. Определите концентрацию молекул азота, если при давлении 0,1 МПа средняя квадратичная скорость его молекул составляет 480 м/с.

25. Газ массой 2 кг занимает объем 15 м<sup>3</sup> под давлением 9 кПа. Определите среднюю квадратичную скорость молекул газа.

26. Определите среднюю квадратичную скорость молекул идеального газа, плотность которого при давлении 15 кПа составляет 0,1 кг/м<sup>3</sup>.



## Проверочная работа

### ***Молекулярно-кинетическая теория идеального газа***

1. Какова масса кислорода, содержащегося в баллоне объемом 50 л при температуре 27 °С и давлении 2 МПа?
2. Рассчитайте температуру, при которой средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна  $10,35 \cdot 10^{-21}$  Дж.
3. Определите плотность азота при температуре 27 °С и давлении 100 кПа.
4. При давлении 250 кПа газ массой 8 кг занимает объем 15 м<sup>3</sup>. Чему равна средняя квадратичная скорость движения молекул газа?
5. Какова плотность смеси, состоящей из 32 г кислорода и 22 г углекислого газа, при температуре 0 °С и давлении 100 кПа?

### **Уравнение Менделеева – Клапейрона**

***Универсальная газовая постоянная.*** Каждая физически однородная система, состоящая из большого числа частиц (газ, жидкость или твердое тело) и находящаяся в состоянии теплового равновесия, характеризуется своим *уравнением состояния*, т.е. уравнением, связывающим давление, объем и абсолютную температуру [10].

Уравнение, устанавливающее связь между давлением, объемом и температурой газов, было получено французским физиком Б. Клапейроном путем обобщения многочисленных экспериментальных данных. В наиболее удобной форме, используемой вплоть до настоящего времени, его впервые применил Д.И. Менделеев. Поэтому *уравнение состояния идеального газа* называется также *уравнением Менделеева – Клапейрона*. Оно имеет вид:

$$PV = \frac{m}{M}RT,$$

где  $P$  – давление,  
 $V$  – объем газа,  
 $m$  – масса газа,  
 $M$  – молярная масса газа,  
 $R$  – универсальная газовая постоянная,  
 $T$  – абсолютная температура.

### **Закон Авогадро**

**Газы с одинаковыми значениями температуры и давления имеют одинаковые концентрации**

Данный закон может быть записан в виде формулы:

$$p = n \cdot k \cdot T.$$

### **Задачи для самостоятельного решения**

27. Найти массу 3 л кислорода при температуре 13 °С и давлении 47 кПа.

28. Найти плотность водорода при температуре –24 °С и давлении 95 кПа.

29. Какой объем занимает воздух массой 15 г при давлении 10<sup>4</sup> Па и температуре 36 °С? Молярная масса воздуха равна 29 г/моль.

30. При температуре 5 °С газ массой 41,5 г занимает объем 0,16 м<sup>3</sup>. Давление равно 15 кПа. Определите название газа.

31. При какой температуре 10 грамм азота занимают объем 12 л под давлением 80 кПа?

32. Во сколько раз увеличится объем пузырька воздуха, поднявшегося при постоянной температуре с глубины 8 км на поверхность? Атмосферное давление нормальное.

33. Найдите объем водорода массой 1 кг при температуре 27 °С и давлении 100 кПа.

34. В баллоне объемом 200 л находится гелий под давлением 100 кПа при температуре 17 °С. После подкачивания гелия его давление увеличилось до 300 кПа, а температура увеличилась до 47 °С. На сколько увеличилась масса газа?

35. Какова плотность азота при температуре 17 °С и давлении 100 кПа?

36. Определите объем, занимаемый ртутью количеством вещества 40 моль. Плотность ртути 13,6 г/см<sup>3</sup>.

37. Определите плотность кислорода при температуре 300 К, если давление постоянно и равно 0,1 МПа.

### Газовые законы

С помощью уравнения состояния идеального газа можно исследовать процессы, в которых масса газа и один из трех параметров: давление, объем или температура — остаются неизменными. Особую роль в физике и технике играют три процесса — изотермический, изохорный и изобарный [10].

*Изотермическим процессом* называется процесс, протекающий при постоянной температуре  $T$ . Из уравнения состояния идеального газа следует, что в таком процессе произведение давления газа на его объем должно оставаться постоянным. Этот вывод необходимо запомнить:

**Для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления на объем есть величина постоянная:**

$$pV = const.$$

График изотермического процесса называется *изотермой*. На плоскости переменных объем – давление он представляет собой гиперболу. Уравнение было получено экспе-

риментально английскими физиками Р. Бойлем и Э. Мариоттом задолго до создания молекулярно-кинетической теории. Это уравнение называют *законом Бойля – Мариотта*.

Процесс, протекающий при постоянном объеме, называется *изохорным*.

**Для газа данной массы при постоянном объеме отношение давления к температуре постоянно:**

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

График изохорного процесса называется *изохорой*. На плоскости переменных температура – давление он представляет собой отрезок прямой, продолжение которого проходит через начало координат. Экспериментальным путем зависимость давления газа от температуры исследовал французский физик Ж. Шарль. Поэтому уравнение называется *законом Шарля*.

Процесс изменения состояния газа при постоянном давлении называется *изобарным*. **Объем данной массы газа при постоянном давлении зависит от температуры по линейному закону.**

Его уравнение имеет вид:

$$\frac{V}{T} = const.$$

Этот закон был установлен экспериментально французским ученым Ж. Гей-Люссаком и носит название *закона Гей-Люссака*. График изобарного процесса называется *изобарой*. На плоскости переменных температура – объем он представляет собой отрезок прямой, продолжение которого проходит через начало координат.

**Задание.** Составьте опорный конспект по теме «Газовые законы», используя текст параграфа.

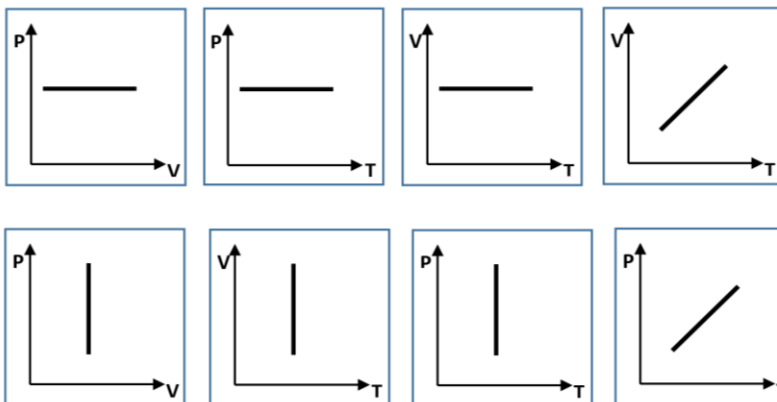
### **Вопросы и задания для самоконтроля**

1. Какая величина остается неизменной в каждом изо-процессе?
2. Запишите газовый закон для каждого процесса в общем виде.
3. Как называется график каждого изопроцесса?

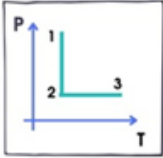
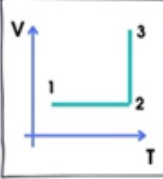

**Задание 1.** Заполните таблицу «Графики изопроцессов»: постройте график во всех координатных осях.

Процесс	График в осях $PV$	График в осях $PT$	График в осях $VT$
Изотермический			
Изохорный			
Изобарный			

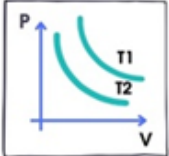
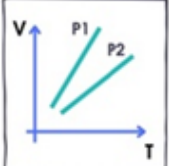
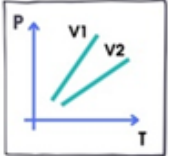
**Задание 2.** Перед вами графики изопроцессов. Под каждым из них подпишите, какой именно это процесс, как называется график. Свой ответ обоснуйте.



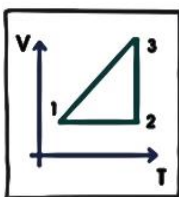
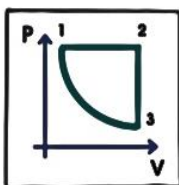
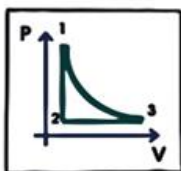
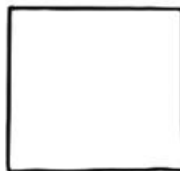
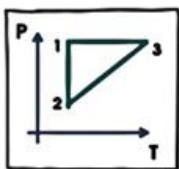
**Задание 3.** «Что происходит...». Изучив процессы на графике, в каждой строке продолжите фразу.

<p>При переходе из состояния 1 в состояние 2 постоянного количества идеального газа его объем ...</p>	
<p>При переходе из состояния 1 в состояние 3 постоянного количества идеального газа его давление сначала ... , потом ...</p>	
<p>В сосуде под поршнем находится идеальный газ постоянной массы. Какому состоянию газа соответствует наибольший объем?</p>	

**Задание 4.** Сравните графики и ответьте на вопросы.

	<p>Какая температура выше (<math>T1</math> или <math>T2</math>)?</p>
	<p>Какое давление ниже (<math>P1</math> или <math>P2</math>)?</p>
	<p>Какой объем больше (<math>V1</math> или <math>V2</math>)?</p>

**Задание 5. Постройте** график в других координатных осях.



**Задачи для самостоятельного решения**

38. Какой объем займет газ при  $77^\circ\text{C}$ , если при  $27^\circ\text{C}$  его объем  $6\text{ м}^3$ ? Давление считать постоянным.

39. В баллоне объемом  $10\text{ м}^3$  находится водород под давлением  $2\text{ МПа}$ . Баллон какого объема понадобился бы для хранения такого же количества водорода при атмосферном давлении, равном  $0,1\text{ МПа}$ , при той же температуре?

40. Воздух находится под давлением 50,65 кПа. Во сколько раз уменьшится его объем, если давление станет равным 202,6 кПа? Температура постоянна.

41. Газ при температуре 15 °С занимает некоторый объем. До какой температуры его следует изобарно охладить, чтобы объем уменьшился в 1,2 раза?

42. Два баллона соединили трубкой с краном. В баллоне емкостью 5 л находится воздух под давлением 300 кПа, другой баллон емкостью 1 л пустой. Какое давление установится в баллонах, если открыть кран? Температура постоянна.

43. В процессе изобарного охлаждения объем идеального газа уменьшился в 2 раза. Какова конечная температура, если его начальная была 819 °С? Масса газа постоянна.

44. В процессе изохорного охлаждения давление газа уменьшилось в 3 раза. Какой была начальная температура газа, если конечная температура стала равной 27 °С?

45. В процессе изобарного нагревания объем газа увеличился в 2 раза. На сколько градусов нагрели газ, если его начальная температура 273 °С?

46. При изотермическом процессе объем газа увеличился в 6 раз, а давление уменьшилось на 50 кПа. Определите конечное давление газа.

47. Определите начальную температуру идеального газа, если при изобарном нагревании на 300 К его объем увеличился в 1,2 раза.

48. Определите, на сколько увеличился объем идеального газа, если при его изобарном нагревании его температура возросла в 1,5 раза, а первоначальный объем был 100 см<sup>3</sup>.



49. При нагревании газа в закрытом сосуде на 10 К его давление возросло в 1,5 раза. Определите начальную температуру.

50. На рисунке 4 представлен круговой процесс в идеальном газе в координатах  $PV$ . Преобразуйте график в координатах  $PT$  (проанализируйте процесс на каждом участке).

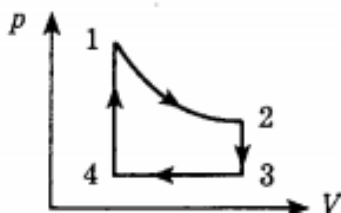


Рис. 4. К условию задачи 50

### Закон Дальтона

В природе и в технике мы очень часто имеем дело не только с одним чистым газом, но со смесью нескольких газов. Например, воздух, это смесь азота, кислорода, аргона, углекислого газа и других газов.

В 1801 г. Джон Дальтон установил, что **давление смеси нескольких газов равно сумме парциальных давлений всех газов, составляющих смесь.**

Продемонстрируем это наглядно на схеме (рис. 5).

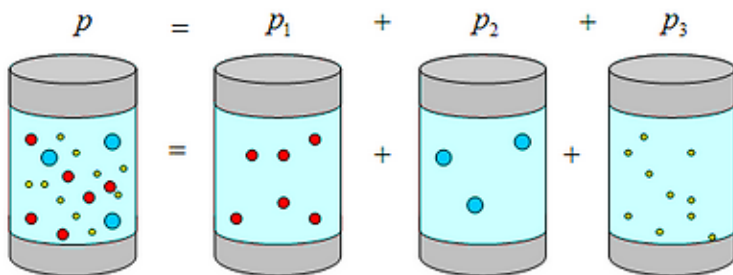


Рис. 5. Закон Дальтона для смеси газов

Закон Дальтона устанавливает, что давление смеси (идеальных) газов составляет сумму парциальных давлений компонент смеси.

*Парциальное давление* компоненты — это давление, которое компонента оказала бы, если бы она одна занимала все пространство, занятое смесью.

Математически это можно записать следующим образом:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n.$$

Этот закон указывает, что на каждую компоненту не воздействует присутствие других компонент и свойства компоненты в смеси не меняются.

### **Задачи для самостоятельного решения**

51. В баллоне емкостью 10 л при температуре 290 К закачаны 5 моль водорода и 6 моль гелия. Определите давление смеси газов.

52. Каково давление смеси газов в объеме 2 л, если в ней находится  $10^{15}$  молекул кислорода и  $10^{-7}$  г азота, а температура смеси 50 °С?

53. В закрытом сосуде вместимостью 15 л находятся водород массой 5 г и гелий массой 10 г. Считая газы идеальными, определите давление газовой смеси в сосуде, если ее температура 290 К.

54. В сосуде находится смесь водорода массой 6 г и гелия 12 г. Определите молярную массу газовой смеси в сосуде.

55. Определите плотность смеси газов гелия массой 10 г и водорода массой 5 г при температуре 300 К и давлении 100 кПа. Газы считать идеальными.

56. Контейнер объемом 10 литров содержит 1 моль азота и 3 моля водорода при температуре 298 К. Рассчитайте суммарное давление (в атм), если каждый компонент является идеальным газом.

57. Сосуд емкостью  $0,1 \text{ м}^3$  содержит 2 моль газа. Сосуд неизвестного объема, содержащий 6 моль газа при той же температуре, соединяют с первым сосудом. Вычислите неизвестный объем, если давление смеси газов оказалось 33,2 кПа при 300 К.

58. Три сферы радиусами 4 см, 8 см, 10 см заполнены газом и соединены тонкими трубками, перекрытыми кранами (рис. 6). Давление газа в левой сфере 0,2 МПа, средней — 0,4 МПа, правой — 0,8 МПа. Каким станет давление газа, если оба крана открыть?

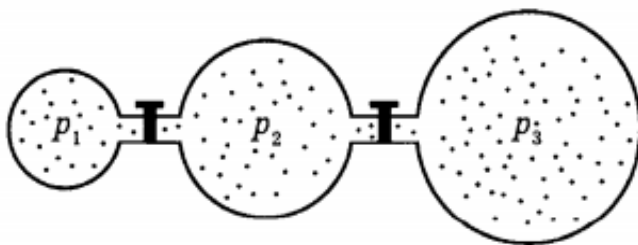


Рис. 6. К условию задачи 58

## ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ

Частицы любого тела — атомы или молекулы — совершают хаотическое непрекращающееся движение (так называемое *тепловое движение*). Поэтому каждая частица обладает некоторой кинетической энергией.

Кроме того, частицы вещества взаимодействуют друг с другом силами электрического притяжения и отталкивания, а также посредством ядерных сил. Следовательно, вся система частиц данного тела обладает потенциальной энергией. Кинетическая энергия теплового движения частиц и потенциальная энергия их взаимодействия вместе образуют новый вид энергии, не сводящийся к механической энергии тела (то есть кинетической энергии движения тела как целого и потенциальной энергии его взаимодействия с другими телами). Этот вид энергии называется внутренней энергией [4].

*Внутренняя энергия тела* — это суммарная кинетическая энергия теплового движения его частиц плюс потенциальная энергия их взаимодействия друг с другом.

*Внутренняя энергия термодинамической системы* — это сумма внутренних энергий тел, входящих в систему.

Таким образом, внутреннюю энергию тела образуют следующие слагаемые.

1. Кинетическая энергия непрерывного хаотического движения частиц тела. Сюда входит кинетическая энергия поступательного движения частиц, а также кинетическая энергия их колебаний и вращений. Кинетическая энергия движения тела как целого не входит в состав внутренней энергии.

2. Потенциальная энергия взаимодействия молекул (атомов) друг с другом.

3. Энергия электронов в атомах.

4. Внутрядерная энергия.

В случае простейшей модели вещества — идеального газа — для внутренней энергии можно получить явную формулу. Проследим это в следующей теме.

### **Внутренняя энергия одноатомного идеального газа**

Потенциальная энергия взаимодействия частиц идеального газа равна нулю (напомним, что в модели идеального газа мы пренебрегаем взаимодействием частиц на расстоянии). Поэтому внутренняя энергия одноатомного идеального газа сводится к суммарной кинетической энергии поступательного движения его атомов. Эту энергию можно найти, умножив число  $N$  атомов газа на среднюю кинетическую энергию  $E$  одного атома:

$$U = N \cdot E = N \cdot \frac{3}{2} k \cdot T = \nu \cdot N_A \cdot \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{3}{2} \cdot \nu \cdot R \cdot T,$$

иначе можно записать следующим образом:

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

Мы видим, что внутренняя энергия идеального газа (масса и химический состав которого неизменны) является функцией только его температуры. У реального газа, жидкости или твердого тела внутренняя энергия будет зависит от объема, так как при изменении объема изменяется взаимное расположение частиц и, как следствие, – потенциальная энергия их взаимодействия.

Важнейшее свойство внутренней энергии заключается в том, что она является *функцией состояния* термодинамической системы. Внутренняя энергия однозначно определяется набором макроскопических параметров, характеризующих систему, и не зависит от «предыстории» системы, то есть от того, в каком состоянии система находилась прежде и каким конкретно образом она оказалась в данном состоянии [10].

Так, при переходе системы из одного состояния в другое изменение ее внутренней энергии определяется лишь начальным и конечным состояниями системы и *не зависит* от пути перехода из начального состояния в конечное.

### **Изменение внутренней энергии**

Если система возвращается в исходное состояние, то изменение ее внутренней энергии равно нулю.

Опыт показывает, что существует лишь два способа изменения внутренней энергии тела:

- 1) совершение механической работы;
- 2) теплопередача.

Рассмотрим эти способы подробнее.

**Совершение работы.** Если работа совершается *над* телом, то внутренняя энергия тела возрастает. Например, гвоздь после удара по нему молотком нагревается и немного деформируется. Но температура — это мера средней кинетической энергии частиц тела. Нагревание гвоздя свидетельствует об увеличении кинетической энергии его частиц: частицы разгоняются от удара молотком и от трения гвоздя о доску.

Деформация же есть не что иное, как смещение частиц друг относительно друга; гвоздь после удара испытывает деформацию сжатия, его частицы сближаются, между ними

возрастают силы отталкивания, и это приводит к увеличению потенциальной энергии частиц гвоздя. Итак, внутренняя энергия гвоздя увеличилась. Это явилось результатом совершения над ним работы — работу совершили молоток и сила трения о доску. Если же работа совершается *самим* телом, то внутренняя энергия тела уменьшается. Пусть, например, сжатый воздух в теплоизолированном сосуде под поршнем расширяется и поднимает некий груз, совершая тем самым работу. В ходе такого процесса воздух охлаждается: его молекулы, ударяя вдогонку по движущемуся поршню, отдают ему часть своей кинетической энергии. Следовательно, внутренняя энергия воздуха уменьшается. Воздух, таким образом, совершает работу за счет своей внутренней энергии: поскольку сосуд теплоизолирован и нет притока энергии к воздуху от каких-либо внешних источников, черпать энергию для совершения работы воздух может только из собственных запасов [6].

**Теплопередача** — это процесс перехода внутренней энергии от более горячего тела к более холодному, не связанный с совершением механической работы. Теплопередача может осуществляться либо при непосредственном контакте тел, либо через промежуточную среду (и даже через вакуум). Теплопередача называется *теплообменом*. Различают три вида теплопередачи: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение (рис. 7).

**Теплопроводность.** Если, взяв в руку железный стержень, поместить его одним концом в огонь, то долго держать его в руке не получится. Попадая в область высокой температуры, атомы железа начинают колебаться интенсивнее (т.е. приобретают добавочную кинетическую энергию) и наносят более сильные удары по своим соседям. Кинетическая энергия соседних атомов также возрастает, и

эти атомы сообщают дополнительную кинетическую энергию своим соседям. Так от участка к участку тепло постепенно распространяется по стержню — от помещенного в огонь конца до руки. Это и есть теплопроводность (рис. 8).

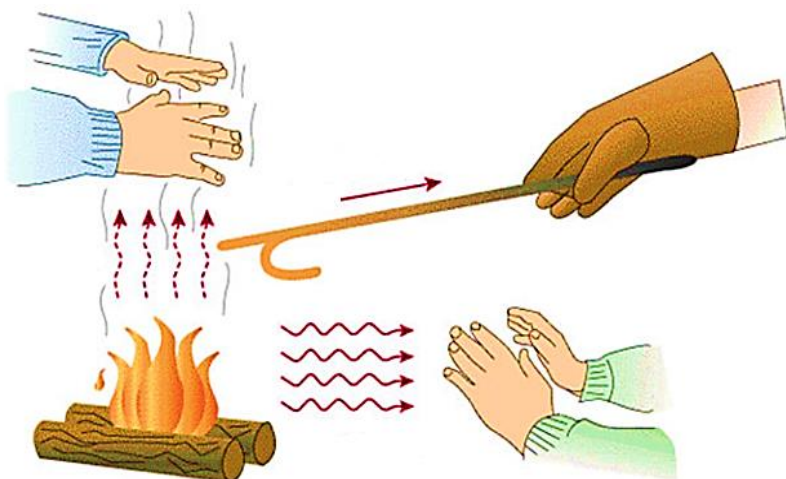


Рис. 7. Три вида теплопередачи:  
теплопроводность, конвекция, излучение

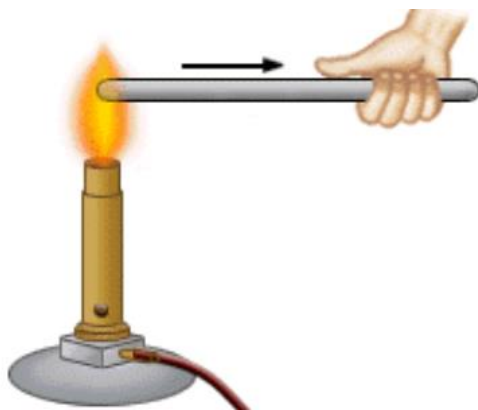


Рис. 8. Теплопроводность



*Теплопроводность* — это перенос внутренней энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым за счет теплового движения и взаимодействия частиц тела.

Теплопроводность разных веществ различна. Высокую теплопроводность имеют металлы: лучшими проводниками тепла являются серебро, медь и золото. Теплопроводность жидкостей гораздо меньше. Газы проводят тепло настолько плохо, что относятся уже к теплоизоляторам: молекулы газов из-за больших расстояний между ними слабо взаимодействуют друг с другом.

Вот почему, например, в окнах делают двойные рамы: прослойка воздуха препятствует уходу тепла. Плохими проводниками тепла являются поэтому пористые тела — такие, как кирпич, вата или мех. Они содержат в своих порах воздух. Недаром кирпичные дома считаются самыми теплыми, а в мороз люди надевают меховые шубы и куртки с прослойкой пуха или синтепона.

**Конвекция** — это перенос внутренней энергии в жидкостях или газах в результате циркуляции потоков и перемешивания вещества.

Воздух вблизи батареи нагревается и расширяется. Действующая на этот воздух сила тяжести остается прежней, а выталкивающая сила со стороны окружающего воздуха увеличивается, так что нагретый воздух начинает всплывать к потолку. На его место приходит холодный воздух, с которым повторяется то же самое.

В результате устанавливается циркуляция воздуха, которая и служит примером конвекции: распространение тепла в комнате осуществляется воздушными потоками.

Аналогичный процесс можно наблюдать и в жидкости. Когда вы ставите на плиту чайник или кастрюлю с водой, нагревание воды происходит в первую очередь благодаря

конвекции (вклад теплопроводности воды незначителен). Конвекционные потоки в воздухе и жидкости показаны на рис. 9.

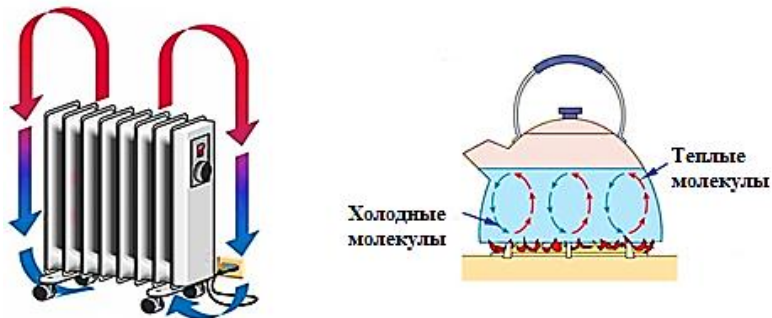


Рис. 9. Конвекция

В твердых телах конвекция отсутствует: силы взаимодействия частиц велики, частицы колеблются вблизи фиксированных пространственных точек (узлов кристаллической решетки), и никакие потоки вещества в таких условиях образоваться не могут. Для циркуляции конвекционных потоков при отоплении комнаты необходимо, чтобы нагретому воздуху *было куда всплывать*. Если радиатор установить под потолком, то никакая циркуляция не возникнет — теплый воздух так под потолком и останется. Именно поэтому нагревательные приборы помещают *внизу* комнаты. По той же причине чайник ставят *на* огонь, в результате чего нагретые слои воды, поднимаясь, уступают место более холодным.

Наоборот, кондиционер нужно располагать как можно выше: тогда охлажденный воздух начнет опускаться, и на его место будет приходиться более теплый. Циркуляция пойдет в обратном направлении по сравнению с движением потоков при обогреве комнаты.

**Тепловое излучение.** Каким образом Земля получает энергию от Солнца? Теплопроводность и конвекция исключены: нас разделяет 150 миллионов километров безвоздушного пространства. Здесь работает третий вид теплопередачи – *тепловое излучение*. Излучение может распространяться как в веществе, так и в вакууме. Как же оно возникает? Оказывается, электрическое и магнитное поля тесно связаны друг с другом и обладают одним замечательным свойством. Если электрическое поле изменяется со временем, то оно порождает магнитное поле, которое, также изменяется со временем. В свою очередь переменное магнитное поле порождает переменное электрическое поле, которое опять порождает переменное магнитное поле, которое опять порождает переменное электрическое поле.

В результате развития этого процесса в пространстве распространяется *электромагнитная волна* — «зацепленные» друг за друга электрическое и магнитное поля. Как и звук, электромагнитные волны обладают скоростью распространения и частотой — в данном случае это частота, с которой колеблются в волне величины и направления полей. Видимый свет — частный случай электромагнитных волн.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме огромна: 300 000 км/с. Так, от Земли до Луны свет идет чуть больше секунды. Частотный диапазон электромагнитных волн очень широк. Отметим лишь, что видимый свет – это крохотный диапазон данной шкалы. Ниже него лежат частоты инфракрасного излучения, выше — частоты ультрафиолетового излучения. Атомы, будучи в целом электрически нейтральными, содержат положительно заряженные протоны и отрицательно заряженные электроны. Эти заряженные частицы, совершая вместе с атомами хао-

тическое движение, создают переменные электрические поля и тем самым излучают электромагнитные волны. Эти волны и называются *тепловым излучением*: их источником служит тепловое движение частиц вещества.

Источником теплового излучения является любое тело. При этом излучение уносит часть его внутренней энергии. Встретившись с атомами другого тела, излучение разгоняет их своим колеблющимся электрическим полем, и внутренняя энергия этого тела увеличивается. При обычных температурах частоты теплового излучения лежат в инфракрасном диапазоне, так что глаз его не воспринимает. При нагревании тела его атомы начинают излучать волны более высоких частот. Железный гвоздь можно раскалить докрасна — довести до такой температуры, что его тепловое излучение выйдет в нижнюю (красную) часть видимого диапазона. А Солнце кажется человеку желто-белым: температура на поверхности Солнца настолько высока (6 000 °C), что в спектре его излучения присутствуют все частоты видимого света.

### **Количество теплоты**

Как известно, одним из способов изменения внутренней энергии является теплопередача (теплообмен). Предположим, что тело участвует в теплообмене с другими телами, и при этом не совершается механическая работа — ни самим телом, ни другими телами над этим телом.

*Если в процессе теплообмена внутренняя энергия тела изменилась на величину  $\Delta U$ , то говорят, что тело получило соответствующее количество теплоты:  $Q = \Delta U$ .*

Если при этом величина  $\Delta U$  отрицательна, то есть тело отдавало энергию, то говорят также, что тело *отдавало тепло*.

*Удельная теплоемкость вещества.* Предположим, что в процессе теплообмена агрегатное состояние вещества тела не изменяется (не происходит плавление, кристаллизация, парообразование или конденсация). Начальную температуру тела обозначим  $t_1$ , конечную температуру  $t_2$ .

Опыт показывает, что количество теплоты, полученное телом, прямо пропорционально массе тела  $m$  и разности конечной и начальной температур:

$$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1).$$

Коэффициент пропорциональности  $c$  называется *удельной теплоемкостью вещества* тела.

Удельная теплоемкость не зависит от формы и размеров тела. Удельные теплоемкости различных веществ можно найти в таблицах. Введя обозначение  $\Delta t = t_2 - t_1$ , получим также:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta t.$$

Чтобы понять физический смысл удельной теплоемкости, выразим ее из последней формулы:

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

Мы видим, что *удельная теплоемкость численно равна количеству теплоты, которое необходимо для нагревания 1 кг данного вещества на 1°C (или, что то же самое, на 1К).* Измеряется удельная теплоемкость в Дж/(кг·°C) или в Дж/(кг·К).

Чем больше удельная теплоемкость вещества, тем большее количество теплоты требуется для нагревания тела данной массы на заданное количество градусов.

В задачах часто фигурируют вода и лед. Их удельные теплоемкости равны соответственно:

Вода:  $c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{°C})$ .

Лед:  $c_{\text{л}} = 2100 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{°C})$ .

Произведение удельной теплоемкости вещества на массу тела называется *теплоемкостью тела* и обозначается  $C$ :

$$C = c \cdot m.$$

Соответственно, для количества теплоты имеем:

$$Q = C \cdot (t_2 - t_1).$$

### Уравнение теплового баланса

Рассмотрим два тела (обозначим их 1 и 2), которые образуют замкнутую систему. Это означает, что данные тела могут обмениваться энергией только друг с другом, но не с другими телами [2].

Считаем также, что механическая работа не совершается – внутренняя энергия тел меняется только в процессе теплообмена.

Имеется фундаментальный закон природы, подтверждаемый всевозможными экспериментами – закон сохранения энергии. Он гласит, что *полная энергия замкнутой системы тел не меняется со временем*.

В данном случае закон сохранения энергии утверждает, что внутренняя энергия нашей системы будет оставаться одной и той же:  $U_1 + U_2 = \text{const}$ . Если изменение внутренней энергии первого тела равно  $\Delta U_1$ , а изменение внутренней энергии второго тела равно  $\Delta U_2$ , то суммарное изменение внутренней энергии будет равно нулю:

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

Но  $\Delta U_1 = Q_1$  – количество теплоты, полученное первым телом в процессе теплообмена; аналогично  $\Delta U_2 = Q_2$  – количество теплоты, полученное вторым телом в процессе теплообмена.

Стало быть,

$$Q_1 + Q_2 = 0.$$

Попросту говоря, сколько джоулей тепла отдало одно тело, ровно столько же джоулей получило второе тело. Так как система замкнута, ни один джоуль не был потерян. Полученное выше соотношение называется *уравнением теплового баланса*.

В общем случае, когда  $n$  тел образуют замкнутую систему и обмениваются энергией только с помощью теплопередачи, из закона сохранения энергии с помощью тех же рассуждений получаем общее уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0.$$

В качестве простого примера применения уравнения теплового баланса рассмотрим следующую задачу.

*Смешали  $m_1 = 200$  г воды при температуре  $t_1 = 80$  °С и  $m_2 = 300$  г воды при температуре  $t_2 = 20$  °С. Найти установившуюся температуру смеси.*

Обозначим искомую установившуюся температуру через  $\theta$ . Запишем уравнение теплового баланса:

$$c \cdot m_1 \cdot (\theta - t_1) + c \cdot m_2 \cdot (\theta - t_2) = 0,$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воды.

Подставив числовые значения, получим значение конечной температуры смеси, равное 44 °С.

**Уравнение теплового баланса.** Если внутри теплоизолированной системы не совершается механическая работа, то для нее справедливо *уравнение теплового баланса*:

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0.$$

**Алгоритм решения задач по калориметрии  
(расчет количества теплоты)**

1. Установить, какие тела участвуют в тепловых процессах, описанных в задаче, и какие тела отдают количество теплоты, а какие получают.
2. Выяснить, в ходе каких процессов происходит выделение количества теплоты, и написать уравнения для нахождения количества теплоты в каждом процессе.
3. Выяснить, в ходе каких процессов происходит поглощение количества теплоты, и записать уравнения для нахождения количества теплоты в каждом процессе.
4. Написать уравнение теплового баланса, раскрыть значение каждой из входящих в него величин и решить уравнение относительно искомой величины.

***Задачи для самостоятельного решения***

59. С какой высоты должна упасть капля воды, чтобы при ударе о землю она нагрелась на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

60. На нагревание 15 л воды было затрачено 315 кДж энергии. На сколько градусов нагрелась вода?

61. На сколько градусов изменилась температура чугунной детали массой 12 кг, если при остывании она отдала 648 кДж теплоты?

62. Для нагревания медного бруска массой 3 кг от  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  потребовалось 12 000 Дж теплоты. Какова удельная теплоемкость меди?

63. Нагретый камень массой 5 кг, охлаждаясь в воде на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , передает ей 2,1 кДж энергии. Чему равна удельная теплоемкость камня?

64. Какое количество теплоты потребуется для нагревания на  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  воды объемом 0,5 л; олова массой 500 г;



серебра объемом  $2 \text{ см}^3$ ; стали объемом  $0,5 \text{ м}^3$ ; латуни массой  $0,2 \text{ т}$ ?

65. Стальная деталь массой  $3 \text{ кг}$  нагрелась от  $25$  до  $45$  °С. Какое количество теплоты было израсходовано?

66. В железный котел массой  $5 \text{ кг}$  налита вода массой  $10 \text{ кг}$ . Какое количество теплоты нужно передать котлу с водой для изменения их температуры от  $10$  до  $100$  °С?

67. В сосуде содержится  $3 \text{ л}$  воды при температуре  $20$  °С. Сколько воды при температуре  $45$  °С надо добавить в сосуд, чтобы в нем установилась температура  $30$  °С? Необходимый свободный объем в сосуде имеется. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

68. При охлаждении медного паяльника до  $20$  °С выделилось  $30,4 \text{ кДж}$  энергии. До какой температуры был нагрет паяльник, если его масса  $200 \text{ г}$ ?

69. В алюминиевом чайнике массой  $400 \text{ г}$  нагрели  $2 \text{ л}$  воды от  $15$  °С до кипения. Какое количество теплоты было затрачено?

70. Какое количество теплоты получили алюминиевая кастрюля массой  $200 \text{ г}$  и находящаяся в ней вода объемом  $1,5 \text{ л}$  при нагревании от  $20$  °С до кипения при температуре  $100$  °С?

71. Смешали воду массой  $0,8 \text{ кг}$ , имеющую температуру  $25$  °С, и воду при температуре  $100$  °С массой  $0,2 \text{ кг}$ . Температуру полученной смеси измерили, и она оказалась равной  $40$  °С. Вычислите, какое количество теплоты отдала горячая вода при остывании и получила холодная вода при нагревании. Сравните эти количества теплоты.

72. В воду массой  $1 \text{ кг}$ , температура которой  $10$  °С, вливают кипяток массой  $800 \text{ г}$ . Какова конечная температура воды?

73. В чашке находится горячий чай при температуре  $95$  °С. Масса чая —  $150 \text{ г}$ . Определите массу холодной воды,

которую нужно долить в чашку с чаем, чтобы понизить температуру чая до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура холодной воды  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплоемкость чая считать равной теплоемкости воды, потерями тепла пренебречь.

74. В воду массой  $300\text{ г}$ , температура которой  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , опустили нагретые в кипящей воде металлические гири общей массой  $1\text{ кг}$ . Температура воды повысилась на  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Из какого материала изготовлены гири?

75. В калориметре находилась жидкость массой  $100\text{ г}$  при температуре  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В нее опустили шар массой  $100\text{ г}$ , температура которого  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . После этого в калориметре установилась температура  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Во сколько раз удельная теплоемкость жидкости больше удельной теплоемкости материала шара?

76. Смешали  $1\text{ кг}$  холодной воды при температуре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и горячую воду при температуре  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Температура смеси при этом оказалась равна  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какова масса горячей воды?

77. На графике (рис. 10) показана зависимость количества теплоты, необходимого для нагревания на  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  некоторого вещества, от его массы. Определите, чему равна теплоемкость этого вещества.

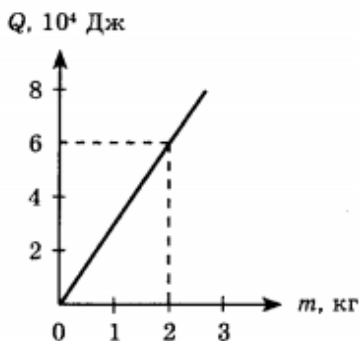


Рис. 10. К условию задачи 77

84. Для приготовления чая турист положил в котелок лед массой 2 кг, имеющий температуру  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо для превращения этого льда в кипяток при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Энергию, израсходованную на нагревание котелка, не учитывать.

85. Сколько энергии нужно затратить, чтобы расплавить лед массой 4 кг при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

86. Сколько энергии требуется затратить, чтобы расплавить свинец массой 20 кг при температуре плавления? Сколько энергии понадобится для этого, если начальная температура свинца  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

87. Какую энергию нужно затратить, чтобы расплавить кусок льда массой 5 кг, взятый при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

88. Какую энергию нужно затратить, чтобы расплавить кусок меди массой 2 кг, взятый при температуре  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

89. Алюминиевый и медный бруски массой 1 кг каждый нагреты до температуры их плавления. Для плавления какого тела потребуется больше количества теплоты? На сколько больше?

90. Объем формы для пищевого льда равен  $750\text{ см}^3$ . Сколько энергии отдадут вода и лед форме и окружающему ее воздуху в холодильнике, если у воды начальная температура  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а температура образовавшегося льда равна  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

91. Железная заготовка, охлаждаясь от температуры  $800$  до  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , растопила лед массой 3 кг, взятый при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какова масса заготовки, если вся энергия, выделенная ею, пошла на плавление льда?

## АГРЕГАТНЫЕ СОСТОЯНИЯ ВЕЩЕСТВА

Из курса физики основной школы известно, что вещество может находиться в нескольких агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Далее рассмотрим каждое из них более подробно [1].

### Газы

Газы — самый простой объект для изучения в молекулярно-кинетической теории. Дело в том, что средние расстояния между частицами газов намного превышают размеры самих частиц. В промежутках между соударениями частицы газа проходят расстояния, на несколько порядков превышающие собственные размеры (рис. 11).

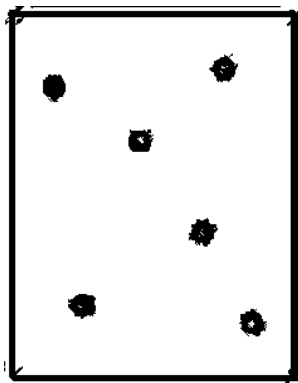


Рис. 11. Частицы газа

Например, в воздухе при нормальных условиях длина свободного пробега молекулы составляет примерно 5–10 см. Это на три порядка превышает средний размер молекулы (8–10 см).

При таких больших расстояниях между частицами силы межмолекулярного взаимодействия оказываются весьма незначительными. *Во многих ситуациях взаимодействием частиц газа на расстоянии можно пренебречь и учитывать лишь их соударения друг с другом.* Вот почему изучать газы гораздо проще, чем жидкости или твердые тела. Не испытывая сильного притяжения со стороны других частиц, любая частица газа обладает полной свободой передвижения и может оказаться в любом месте сосуда. *Поэтому газы не имеют ни фиксированной формы, ни фиксированного объема.* При помещении порции газа в любой сосуд, газ неизменно занимает весь предоставленный ему объем. В зависимости от объема сосуда будут изменяться лишь средние расстояния между частицами газа. Способность газов менять свой объем находит широчайшее применение в технике. Функционирование тепловых двигателей и многих других устройств основано в конечном счете на том, что газ при расширении перемещает поршень и совершает работу.

## **Твердые тела**

По сравнению с газами твердые тела являются их полной противоположностью. В твердых телах частицы расположены весьма близко друг к другу: расстояния между частицами порядка размера самих частиц. Силы взаимодействия между частицами твердого тела очень велики; расположение частиц в пространстве обладает периодической повторяемостью и образует так называемую *кристаллическую решетку*.

На рис. 12 представлена пространственная модель кристаллической решетки. «Шарики» – это атомы вещества,

а линии между ними изображают силы взаимодействия между атомами.

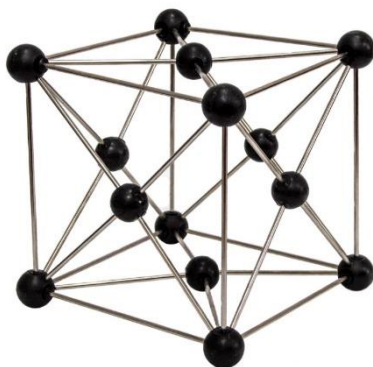


Рис. 12. Пространственная модель кристаллической решетки

Атомы расположены в пространстве периодическим образом, причем каждый атом сцеплен с другими атомами. На рис. 13 мы видим плоское изображение той же самой кристаллической решетки (вдобавок показаны электроны, находящиеся на внешних оболочках атомов кремния).

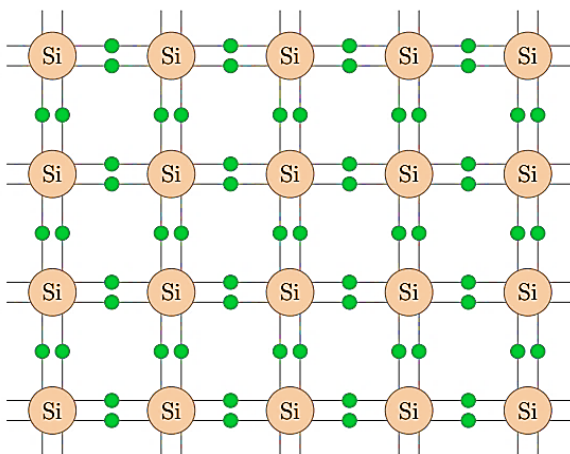


Рис. 13. Плоское изображение кристаллической решетки

Точки пространства, в которых находятся частицы твердого тела, называются *узлами* кристаллической решетки. На самом деле частицы не покоятся в узлах кристаллической решетки, а совершают *тепловое движение* — колеблются относительно этих самых узлов. Таким образом, узел кристаллической решетки — это положение равновесия частицы, в небольшой окрестности которого частица постоянно находится. Чтобы покинуть область своего обитания (выскочить из узла), частице нужна очень большая энергия; произойти такое событие может лишь при чрезвычайно редком стечении обстоятельств. Имея столь жесткую внутреннюю структуру, *твердое тело сохраняет неизменными свою форму и свой объем.*

### **Жидкости**

По своим свойствам жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами: *жидкости сохраняют объем, но не форму.* При переливании жидкости из одного сосуда в сосуд другой формы, объем останется прежним, но при этом она примет форму сосуда.

Как и в твердых телах, частицы жидкости упакованы весьма плотно и совершают колебания около некоторых положений равновесия. Попытка сжатия жидкости немедленно приводит к деформациям самих молекул и встречает мощное сопротивление: жидкости, в отличие от газов, практически не сжимаемы. Однако, в отличие от твердых тел, частица жидкости не привязана навсегда к своему положению равновесия: спустя некоторое время она скачком меняет его на новое положение и колеблется в окружении новых частиц. В связи с таким поведением для молекул жидкости применим термин «оседлая жизнь» молекул. Если сравнить взаимное расположение молекул в твердом и жидком состо-

янии, становится понятно, почему отличаются их физические свойства (рис. 14).

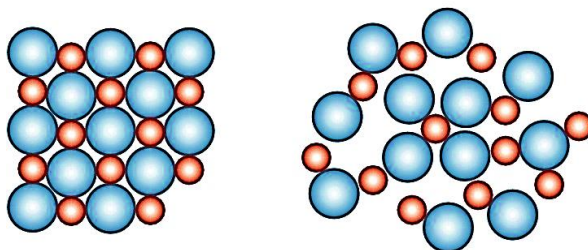


Рис. 14. Взаимное расположение молекул в жидкости

Силы притяжения между частицами жидкости достаточно велики для того, чтобы объем сохранялся фиксированным. Но ограниченность времени «оседлой жизни» частиц придает жидкостям текучесть: жидкости не сохраняют форму [5].

### Фазовые переходы

Лед, вода и водяной пар — примеры трех *агрегатных состояний* вещества: твердого, жидкого и газообразного. В каком именно агрегатном состоянии находится данное вещество — зависит от его температуры и других внешних условий, в которых оно находится. При изменении внешних условий (например, если внутренняя энергия тела увеличивается или уменьшается в результате нагревания или охлаждения) могут происходить *фазовые переходы* — изменения агрегатных состояний вещества тела. Для решения задач нас будут интересовать следующие фазовые переходы:

- *плавление* (твердое тело → жидкость);
- *кристаллизация* (жидкость → твердое тело);
- *парообразование* (жидкость → пар);
- *конденсация* (пар → жидкость).



В различных интервалах температур и давлений большинство веществ может находиться в разных состояниях — газообразном, жидком и твердом. Эти состояния вещества называются агрегатными. Молекулярно-кинетическая теория позволяет объяснить процесс перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое (рис. 15).

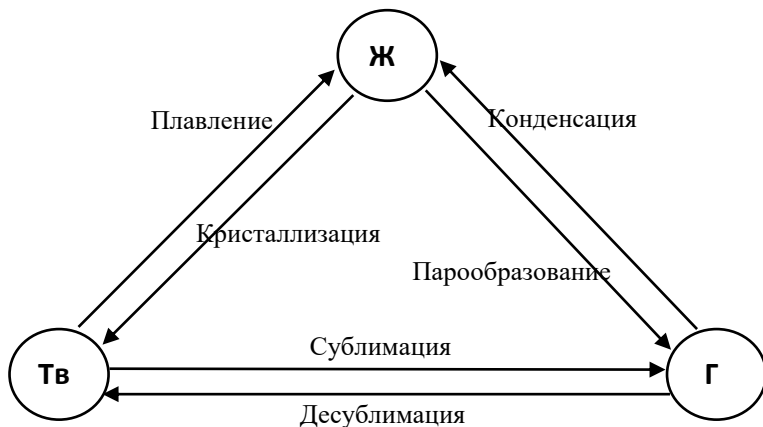


Рис. 15. Фазовые переходы

Иногда вещество при определенных условиях может перейти из одного состояния в другое. Процесс перехода из твердого состояния в газообразное называется *сублимацией (возгонкой)*. Сублимирует кусочек льда в морозный день. Сырое белье замерзает на ветру в мороз и через некоторое время становится сухим (ледяная корочка исчезает). Также сублимирует угольная кислота в брикетах. Вообще любое твердое тело, если оно имеет запах, сублимирует [5].

Взаимные превращения жидкостей и газов описываются процессами парообразования и конденсации. *Парообразованием* называется процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное. Парообразование, происходящее при любой температуре со свободной поверхности жидко-

сти, называется *испарением*. Совокупность молекул, вылетевших из жидкости при парообразовании, называется паром данной жидкости. Образование пара происходит не только у жидкостей, но и у твердых тел. Из поверхностного слоя жидкости вылетают молекулы, обладающие наибольшей скоростью и, следовательно, кинетической энергией теплового движения, поэтому в результате испарения жидкость охлаждается.

Если процесс парообразования происходит в закрытом сосуде, то по истечении некоторого времени количество жидкости перестает убывать, хотя молекулы жидкости, способные покинуть ее поверхность, продолжают переходить в пар. В этом случае наряду с процессом парообразования определяющую роль начинает играть компенсирующий его обратный процесс — конденсация, т.е. превращение пара в жидкость. Концентрация вещества в газообразном состоянии достигает такого значения, при котором число молекул, возвращающихся в жидкость, становится равным числу молекул, покидающих поверхность жидкости за то же время, иными словами, становятся равными скорости парообразования и конденсации. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации. Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется *насыщенным паром*. Пар, находящийся при давлении ниже давления насыщенного пара, является *ненасыщенным*.

*Плавлением твердых тел* называется их переход из твердого состояния в жидкое. В результате плавления происходит разрушение кристаллической решетки твердого тела. Плавление происходит при определенной температуре, называемой *температурой (точкой) плавления*  $T_{\text{пл}}$ . Как правило, плавление твердых тел сопровождается уменьше-

нием плотности. Исключение составляют лед и висмут, у которых плавление сопровождается увеличением плотности.

В процессе плавления твердого тела оно существует одновременно и в твердом, и в жидком состояниях. Температура тела не изменяется при плавлении и остается все время равной  $T_{пл}$ .

Все количество теплоты, которое подводится к твердому телу, расходуется на разрушение кристаллической решетки. Количество теплоты, необходимое для перевода единицы массы твердого тела, находящегося при температуре плавления, в жидкое состояние, называется *удельной теплотой плавления* ( $\lambda$ ).

Переход вещества из жидкого в твердое кристаллическое состояние называется *кристаллизацией* (затвердеванием). Для любой химически чистой жидкости этот процесс идет при постоянной температуре кристаллизации, которая совпадает с температурой плавления  $T_{пл}$ . Кристаллизация единицы массы жидкости сопровождается выделением некоторого количества теплоты — удельной теплоты кристаллизации, — равной удельной теплоте плавления.

Все названные процессы происходят в зависимости от внешних факторов, в т.ч. температуры. Наглядно продемонстрируем зависимость изменения температуры для фазовых переходов (рис. 16).

Если открытый стакан с водой оставить на долгое время, то в конце концов вода полностью улетучится. Точнее — испарится. Что такое испарение и почему оно происходит?

При определенной температуре молекулы жидкости обладают разными скоростями. Скорости большинства молекул находятся вблизи некоторого среднего значения (характерного для этой температуры). Но попадают

молекулы, скорости которых значительно отличаются от средней как в меньшую, так и большую сторону.



Рис. 16. График зависимости изменения внутренней энергии от времени

Когда такая быстрая молекула окажется на свободной поверхности жидкости (то есть на границе раздела жидкости и воздуха), кинетической энергии этой молекулы может хватить на то, чтобы преодолеть силы притяжения остальных молекул и вылететь из жидкости. Данный процесс и есть *испарение*, а молекулы, покинувшие жидкость, образуют *пар*.

*Испарение* — это процесс превращения жидкости в пар, происходящий на поверхности жидкости.

Может случиться, что через некоторое время молекула пара вернется обратно в жидкость. Процесс перехода молекул пара в жидкость называется *конденсацией*. Конденсация пара — процесс, обратный испарению жидкости.

**Задание.** Изучите схему-график фазовых переходов (рис. 16). Определите для каждого из участков: изменяется ли температура, как изменяется внутренняя энергия, как называется процесс, по какой формуле можно рассчитать количество теплоты [3].

### Задачи для самостоятельного решения

92. На рисунке (рис. 17) изображен график зависимости температуры вещества от времени наблюдения при передаче веществу некоторого количества теплоты. В состоянии 1 вещество было твердым. Какому процессу соответствуют участки на графике? Назовите процесс и укажите, получает или отдает тепло в этот момент тело.

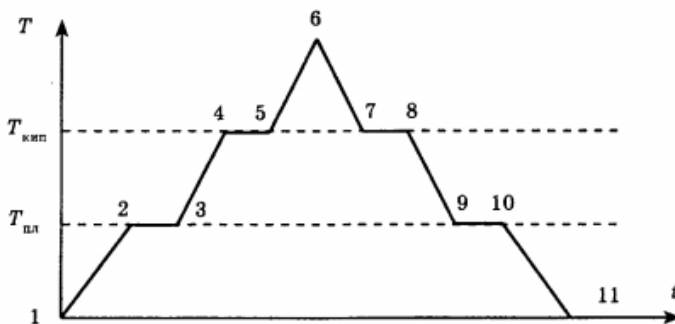


Рис. 17. К условию задачи 92

93. В 3 л воды при температуре  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  бросили 50 г льда с начальной температурой  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какая установилась температура после того, как лед растаял?

94. В калориметр налита вода массой 0,2 кг при температуре  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В эту воду впустили стоградусный пар массой 8 г. Найдите температуру при тепловом равновесии этих тел. Теплоемкость калориметра  $800\text{ Дж/К}$ .

95. В калориметр, содержащий лед массой 100 г при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , впустили пар, температура которого  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сколько воды окажется в калориметре после того, как весь лед растает?

96. Какое количество теплоты необходимо для того, чтобы 8 кг льда при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  довести до точки плавления, расплавить и образовавшуюся воду нагреть до  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

97. Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы 6 кг льда при  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  обратить в пар с температурой  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

98. Сколько килограммов стогоградусного пара потребуется для нагревания стальной детали массой 60 кг от 10 до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

99. В стакан, содержащий 200 г кипятка, опустили серебряную ложку массой 150 г, имеющую начальную температуру  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определите, какая установилась температура?

100. В сосуде смешали холодную воду с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и воду с температурой  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Через некоторое время установилась температура  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Найдите отношение массы холодной воды к массе горячей.

101. В ванну налили и смешали 50 л воды при температуре  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 30 л воды при температуре  $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какой станет температура воды в ванне, если потерями тепла пренебречь?

102. Смешали 24 л воды при  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 40 л воды при  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определите установившуюся температуру, если во время смешивания тепловые потери составили 420 Дж.

103. Свинцовая пуля, встретив препятствие, затормозила в нем и нагрелась на  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определите скорость пули в момент соприкосновения с препятствием, если на нагревание пули было затрачено 30% ее кинетической энергии.

## Динамическое равновесие

Плотность пара над поверхностью жидкости в герметично закрытом сосуде со временем начинает увеличиваться; частицы пара будут все сильнее мешать другим молекулам жидкости вылетать наружу, и скорость испарения станет уменьшаться. Одновременно начнет увеличиваться скорость конденсации, так как с возрастанием концентрации пара число молекул, возвращающихся в жидкость, будет становиться все больше. Наконец, в какой-то момент скорость конденсации окажется равна скорости испарения. Наступит *динамическое равновесие* между жидкостью и паром: за единицу времени из жидкости будет вылетать столько же молекул, сколько возвращается в нее из пара. Начиная с этого момента количество жидкости перестанет убывать, а количество пара — увеличиваться; пар достигнет «насыщения» [6].

*Насыщенный пар* — это пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью. Пар, не достигший состояния динамического равновесия с жидкостью, называется *ненасыщенным*.

Давление и плотность насыщенного пара обозначаются  $p_n$  и  $\rho_n$ . Очевидно,  $p_n$  и  $\rho_n$  — это максимальные давление и плотность, которые может иметь пар при данной температуре. Иными словами, давление и плотность насыщенного пара всегда превышают давление и плотность ненасыщенного пара.

### *Свойства насыщенного пара*

Оказывается, что состояние насыщенного пара (а ненасыщенного — тем более) можно приближенно описывать уравнением состояния идеального газа (уравнением Менделеева – Клапейрона). В частности, имеем приближенное

соотношение между давлением насыщенного пара и его плотностью:

$$p_n = \frac{\rho_n}{M} RT.$$

Это весьма удивительный факт, подтверждаемый экспериментом. Ведь по своим свойствам насыщенный пар существенно отличается от идеального газа. Перечислим важнейшие из этих отличий.

1. *При неизменной температуре плотность насыщенного пара не зависит от его объема.* Если, например, насыщенный пар изотермически сжимать, то его плотность в первый момент возрастет, скорость конденсации превысит скорость испарения, и часть пара конденсируется в жидкость — до тех пор, пока вновь не наступит динамическое равновесие, в котором плотность пара вернется к своему прежнему значению. Аналогично, при изотермическом расширении насыщенного пара его плотность в первый момент уменьшится (пар станет ненасыщенным), скорость испарения превысит скорость конденсации, и жидкость будет дополнительно испаряться до тех пор, пока опять не установится динамическое равновесие, то есть пока пар снова не станет насыщенным с прежним значением плотности.

2. *Давление насыщенного пара не зависит от его объема.* Это следует из того, что плотность насыщенного пара не зависит от объема, а давление однозначно связано с плотностью уравнением. Очевидно, закон Бойля – Мариотта, справедливый для идеальных газов, для насыщенного пара не выполняется. Это и не удивительно — ведь он получен из уравнения Менделеева – Клапейрона на основе предположения, что масса газа остается постоянной.

3. *При неизменном объеме плотность насыщенного пара растет с повышением температуры и уменьшается с понижением температуры.* Действительно, при увеличении температуры возрастает скорость испарения жидкости. Ди-



динамическое равновесие в первый момент нарушается, и происходит дополнительное испарение некоторой части жидкости. Пар будет прибавляться до тех пор, пока динамическое равновесие вновь не восстановится.

Точно так же при понижении температуры скорость испарения жидкости становится меньше, и часть пара конденсируется до тех пор, пока не восстановится динамическое равновесие, но уже с меньшим количеством пара. Таким образом, при изохорном нагревании или охлаждении насыщенного пара его масса меняется, поэтому закон Шарля в данном случае не работает. Зависимость давления насыщенного пара от температуры уже не будет линейной функцией.

4. Давление насыщенного пара растет с температурой быстрее, чем по линейному закону. С увеличением температуры возрастает плотность насыщенного пара; согласно уравнению Менделеева – Клайперона давление пропорционально произведению плотности на температуру. Зависимость давления насыщенного пара от температуры является экспоненциальной (рис. 18). Она представлена участком 1–2 графика. Эту зависимость нельзя вывести из законов идеального газа.

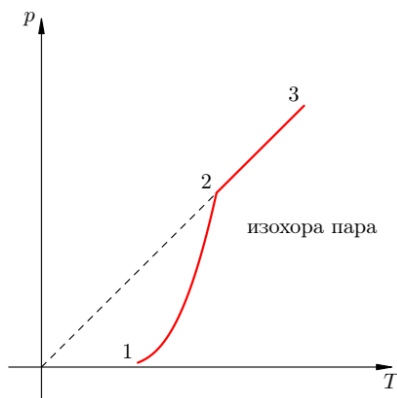


Рис. 18. Зависимость давления пара от температуры

В точке 2 вся жидкость испаряется; при дальнейшем повышении температуры пар становится ненасыщенным, и его давление растет линейно по закону Шарля (участок 2–3).

Линейный рост давления идеального газа вызван увеличением интенсивности ударов молекул о стенки сосуда. В случае нагревания насыщенного пара молекулы начинают бить не только сильнее, но и чаще — ведь пара становится больше. Одновременным действием этих двух факторов и вызван экспоненциальный рост давления насыщенного пара.

Процесс кипения отличается от испарения, которое происходит только со свободной поверхности жидкости. *Кипение* — это парообразование, происходящее *по всему объему* жидкости.

Кипение оказывается возможным потому, что в жидкости всегда растворено какое-то количество воздуха, попавшего туда в результате диффузии. При нагревании жидкости этот воздух расширяется, пузырьки воздуха постепенно увеличиваются в размерах и становятся видимы невооруженным глазом. Внутри воздушных пузырьков находится насыщенный пар, давление которого, как вы помните, быстро растет с повышением температуры. Чем крупнее становятся пузырьки, тем большая действует на них архимедова сила, и с определенного момента начинается отрыв и всплытие пузырьков. Поднимаясь вверх, пузырьки попадают в менее нагретые слои жидкости; пар в них конденсируется, и пузырьки снова сжимаются. Схлопывание пузырьков вызывает шум, предшествующий закипанию воды в чайнике. Наконец, с течением времени вся жидкость равномерно прогревается, пузырьки достигают поверхности и лопаются, выбрасывая наружу воздух и пар — шум сменяется бульканьем, жидкость кипит. Пузырьки, таким образом,

служат «проводниками» пара изнутри жидкости на ее поверхность. При кипении наряду с обычным испарением идет превращение жидкости в пар по всему объему — испарение внутрь воздушных пузырьков с последующим выводом пара наружу. Вот почему кипящая жидкость улетучивается очень быстро: чайник, из которого вода испарялась бы много дней, выкипит за полчаса.

В отличие от испарения, происходящего при любой температуре, жидкость начинает кипеть только при достижении *температуры кипения* — именно той температуры, при которой пузырьки воздуха оказываются в состоянии всплыть и добраться до поверхности. *При температуре кипения давление насыщенного пара становится равно внешнему давлению на жидкость (в частности, атмосферному давлению)*. Соответственно, чем больше внешнее давление, тем при более высокой температуре начнется кипение.

При нормальном атмосферном давлении (1 атм или  $10^5$  Па) температура кипения воды равна  $100^\circ\text{C}$ . Поэтому *давление насыщенного водяного пара при температуре  $100^\circ\text{C}$  равно  $10^5$  Па*. Этот факт необходимо знать для решения задач — часто он считается известным по умолчанию.

На вершине Эльбруса атмосферное давление равно 0,5 атм, и вода там закипит при температуре  $82^\circ\text{C}$ . А под давлением 15 атм вода начнет кипеть только при  $200^\circ\text{C}$ . Температура кипения (при нормальном атмосферном давлении) является строго определенной для данной жидкости величиной. Так, спирт кипит при  $78^\circ\text{C}$ , эфир — при  $35^\circ\text{C}$ , ртуть — при  $357^\circ\text{C}$ . Обратите внимание: чем более летучей является жидкость, тем ниже ее температура кипения. Так, кислород кипит при  $-183^\circ\text{C}$ . Значит, при обычных температурах кислород — это газ [9].

Мы знаем, что если чайник снять с огня, то кипение тут же прекратится: процесс кипения требует непрерывного подвода тепла. Вместе с тем температура воды в чайнике после закипания перестает меняться, все время оставаясь равной  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Куда же при этом исчезает подводимое тепло? Ситуация аналогична процессу плавления: тепло идет на увеличение потенциальной энергии молекул. В данном случае — на совершение работы по удалению молекул на такие расстояния, что силы притяжения окажутся не способными удерживать молекулы неподалеку друг от друга, и жидкость будет переходить в газообразное состояние.

Рассмотрим графическое представление процесса нагревания жидкости — так называемый *график кипения* (рис. 19).

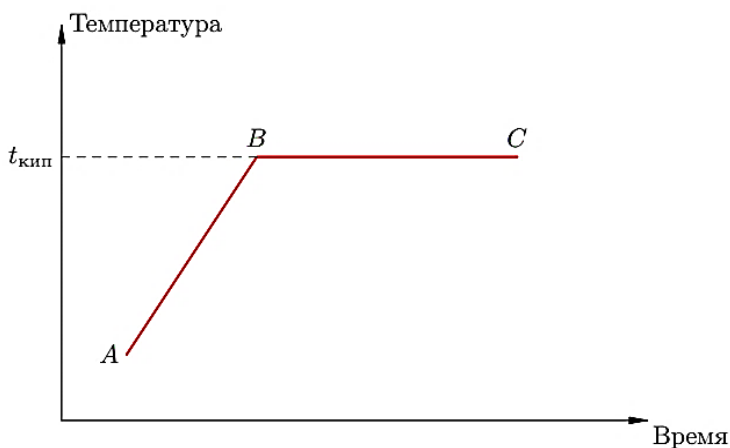


Рис. 19. График кипения

Участок *AB* предшествует началу кипения. На участке *BC* жидкость кипит, ее масса уменьшается. В точке *C* жидкость выкипает полностью. Чтобы целиком пройти участок *BC*, то есть чтобы жидкость, уже доведенную до температуры кипения, полностью превратить в пар, к этой жидкости нужно

подвести некоторое количество теплоты  $Q_{\text{пар}}$ . Опыт показывает, что данное количество теплоты прямо пропорционально массе жидкости:

$$Q_{\text{пар}} = Lm.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *удельной теплотой парообразования* жидкости (при температуре кипения). Удельная теплота парообразования численно равна количеству теплоты, которое нужно подвести к 1 кг жидкости, взятой при температуре кипения, чтобы полностью превратить ее в пар. Так, при 100 °С удельная теплота парообразования воды равна 2300 кДж/кг. Интересно сравнить ее с удельной теплотой плавления льда (340 кДж/кг) — удельная теплота парообразования почти в семь раз больше. Это и неудивительно: ведь для плавления льда нужно лишь разрушить упорядоченное расположение молекул воды в узлах кристаллической решетки; при этом расстояния между молекулами остаются примерно теми же (порядка размеров самих молекул). А вот для превращения воды в пар нужно совершить куда большую работу по разрыву всех связей между молекулами и удалению молекул на значительные расстояния друг от друга (гораздо большие, чем размеры молекул) [10].

### **Влажность воздуха**

Воздух, содержащий водяной пар, называется *влажным*. Чем больше пара находится в воздухе, тем выше *влажность* воздуха.

*Абсолютная влажность* — это парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе (то есть давление, которое водяной пар оказывал бы сам по себе, в отсутствие других газов). Иногда абсолютной влажностью называют также плотность водяного пара в воздухе [11].

**Относительная влажность** воздуха — это отношение парциального давления водяного пара в нем к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре. Как правило, это отношение выражают в процентах:

$$\varphi = \frac{p}{p_n} 100\% .$$

Из уравнения Менделеева – Клапейрона следует, что отношение давлений пара равно отношению плотностей. Так как само уравнение описывает насыщенный пар лишь приближенно, мы имеем приближенное соотношение:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_n} 100\% .$$

Одним из приборов, измеряющих влажность воздуха, является *психрометр*. Он включает в себя два термометра, резервуар одного из которых завернут в мокрую ткань (рис. 20).

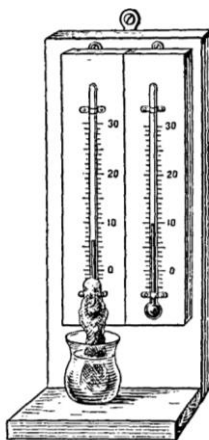


Рис. 20. Психрометр

Чем ниже влажность, тем интенсивнее идет испарение воды из ткани, тем сильнее охлаждается резервуар «мокрого» термометра, и тем больше разность его показаний и показаний сухого термометра [9].

По этой разности с помощью специальной психрометрической таблицы определяют влажность воздуха (рис. 21).

<b>Психрометрическая таблица</b>										
Показа- ния сухо- го термо- метра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Относительная влажность, %									
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34

Рис. 21. Психрометрическая таблица

### ***Задачи для самостоятельного решения***

104. С помощью психрометрической таблицы определите разницу в показаниях сухого и влажного термометра, если температура в помещении 20 °С, а относительная влажность воздуха 44 %.

105. Относительная влажность воздуха в помещении равна 60 %. Разность в показаниях сухого и влажного термометра 4 °С. Пользуясь таблицей, определите показание сухого термометра.

106. В комнате объемом 150 м<sup>3</sup> при температуре 20 °С относительная влажность 51 %. Определите массу водяных паров в воздухе комнаты, если давление насыщенного водяного пара при данной температуре равно 2,33 кПа.

107. В комнате объемом 100 м<sup>3</sup> давление насыщенных паров при температуре 20 °С составляет 2,33 кПа, относительная влажность 18 %. Определите массу воды, которую следует испарить, чтобы при той же температуре относительная влажность достигла 40 %. Молярная масса водяного пара 18 г/моль.

108. Абсолютная влажность воздуха  $9,4 \text{ г/м}^3$ , а плотность насыщенных паров при рассматриваемой температуре составляет  $15,4 \text{ г/м}^3$ . Определите относительную влажность воздуха.

109. Относительная влажность воздуха при температуре  $16 \text{ }^\circ\text{C}$  равна  $65 \%$ . Определите максимальную температуру, при которой выпадет роса.

### Капиллярные явления

Среди процессов, которые можно объяснить с помощью поверхностного натяжения и смачивания жидкостей, стоит особо выделить капиллярные явления.

В жизни такие интересные с точки зрения физики процессы, как капиллярные явления, встречаются весьма часто. Все дело в том, что нас окружает много тел, которые легко впитывают в себя жидкость. Причина этому — их пористая структура и элементарные законы физики, а результат — капиллярные явления [11].

*Капилляр* — это очень узкая трубка, в которой жидкость ведет себя особым образом. Примеров таких сосудов много в природе — капилляры кровеносной системы, пористых тел, почвы, растений и т. д.

*Капиллярным явлением* называется подъем или опускание жидкостей по узким трубкам. Такие процессы наблюдаются в естественных каналах человека, растений и других тел, а также в специальных узких сосудах из стекла. Эти явления лежат в основе впитывающих свойств полотенца, питания растений, движения чернил по стержню и многих других процессов.

*Капиллярные явления в природе.* Описанный выше процесс чрезвычайно важен для поддержания жизнедеятельности растений. Почва довольно рыхлая, между ее частицами



существуют промежутки, которые представляют собой капиллярную сеть. По этим каналам поднимается вода, питая корневую систему растений влагой и всеми необходимыми веществами.

По этим же капиллярам жидкость активно испаряется, поэтому необходимо производить вспахивание земли, которое разрушит каналы и удержит питательные вещества. И наоборот, прижатая земля быстрее испарит влагу. Этим обусловлена важность перепашки земли для удержания подпочвенной жидкости.

В растениях капиллярная система обеспечивает подъем влаги от мелких корешков до самых верхних частей, а через листья она испаряется во внешнюю среду.

Без капиллярных явлений существование живых организмов просто невозможно. Именно по мельчайшим сосудам человеческое тело получает кислород и питательные вещества. Корни растений — это сеть капилляров, которая вытягивает влагу из земли, донося ее до самых верхних листьев.

Простая бытовая уборка невозможна без капиллярных явлений, ведь по этому принципу ткань впитывает воду. Полотенце, чернила, фитиль в масляной лампе и множество устройств работает на этой основе. Капиллярные явления в технике играют важную роль при сушке пористых тел и в других процессах.

Самый распространенный пример капиллярного явления — это принцип работы обыкновенного полотенца или бумажной салфетки. Вода с рук уходит на полотенце или бумажную салфетку за счет подъема жидкости по тонким волокнам, из которых они состоят.

Второй пример — это горение свечи. Топливо поступает по фитилю за счет движения по волокнам фитиля, как по капиллярным трубкам.

В живых организмах именно капилляры являются важной частью кровоснабжения. Для растений крайне важно движение воды в почве. Почва имеет рыхлое строение, и между ее частицами находятся промежутки. Эти промежутки представляют собой капилляры, по которым вода снабжает растения необходимой влагой и питательными солями.

Пример из техники. Строителям приходится учитывать подъем влаги из почвы по порам строительных материалов. Если этого не учесть, то стены зданий отсыреют. Для защиты фундамента и стен от таких вод используют гидроизоляцию [4].

### **Поверхностное натяжение и смачивание**

В основе вопроса о поведении жидкости в сосудах лежат такие физические процессы, как поверхностное натяжение и смачивание. Капиллярные явления, обусловленные ими, изучаются в комплексе [11].

Под действием силы поверхностного натяжения смачивающая жидкость в капиллярах находится выше уровня, на котором она должна находиться согласно закону сообщающихся сосудов. И наоборот, несмачивающая субстанция располагается ниже этого уровня (рис. 22).

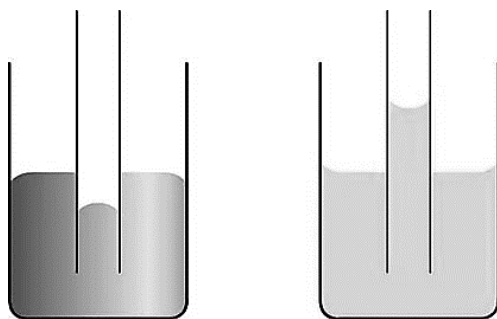


Рис. 22. Капиллярные явления

Так, вода в стеклянной трубке (смачивающая жидкость) поднимается тем выше, чем тоньше сосуд. Напротив, ртуть в стеклянной пробирке (несмачивающая жидкость) опускается тем ниже, чем тоньше эта емкость. Кроме того, как показано на рисунке (рис. 12), смачивающая жидкость образует вогнутую форму мениска, а несмачивающая — выпуклую.

### ***Сила поверхностного натяжения***

Поверхность капли имеет шарообразную форму и причина этому закон, действующий на жидкости, — поверхностное натяжение.

Капиллярные явления связаны с тем, что вогнутая сторона жидкости в трубке стремится выпрямиться до плоского состояния благодаря силам поверхностного натяжения. Это сопровождается тем, что наружные частицы увлекают за собой вверх тела, находящиеся под ними, и субстанция поднимается вверх по трубке. Однако жидкость в капилляре не может принимать плоскую форму поверхности, и этот процесс подъема продолжается до определенного момента равновесия. Чтобы рассчитать высоту, на которую поднимется (опустится) столб воды, нужно воспользоваться формулами, которые будут представлены ниже.

Сила поверхностного натяжения определяется по формуле:

$$F = \sigma \cdot l,$$

где  $l$  — длина контура, ограничивающая поверхность жидкости.

Высоту подъема столба жидкости в капилляре можно рассчитать по формуле:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r}.$$

### ***Вопросы для самоконтроля***

1. Как капиллярный эффект зависит от длины трубки?
2. Чем отличается процесс смачивания на Земле и в космическом корабле?
3. Как еще можно пронаблюдать капиллярные явления на опыте?
4. Почему нельзя сделать «вечный двигатель», который работал бы на капиллярном эффекте?
5. Как будет вести себя капля в капилляре переменной толщины?

### ***Задачи для самостоятельного решения***

110. Определите высоту, на которую поднимается вода, полностью смачивающая капилляр радиусом 0,4 мм. Поверхностное натяжение воды 74 мН/м, плотность 1 г/см<sup>3</sup>.

111. Определите радиус капиллярной трубки, если при полном смачивании вода в капилляре поднимается на высоту 5 см. Поверхностное натяжение воды 74 мН/м, плотность 1 г/см<sup>3</sup>.

112. В капилляре радиусом 0,3 мм жидкость поднялась на высоту 18,9 мм. Определите плотность жидкости, если ее поверхностное натяжение 22 мН/м.

113. Во сколько раз высота подъема воды в стеблях риса со средним диаметром капилляров 0,02 мм больше, чем в почве с капиллярами диаметром 0,3 мм?

114. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения спирта, если в капиллярной трубке диаметром 1 мм он поднялся на 11 мм? Плотность спирта 790 кг/м<sup>3</sup>.

115. Во сколько раз отличаются высоты поднятия бензина и спирта в капиллярах одинакового радиуса? Поверхностное натяжение бензина 21 мН/м, спирта 22 мН/м; плотность бензина 0,7 г/см<sup>3</sup>, спирта 0,79 г/см<sup>3</sup>.

116. Определить массу воды, поднявшейся в капилляре радиусом 0,25 мм, если поверхностное натяжение воды 74 мН/м.

117. Сообщающиеся сосуды представляют собой капилляры диаметром 0,6 мм и 0,1 мм. Найдите разность уровней воды в капиллярах. Коэффициент поверхностного натяжения воды 73 мН/м, плотность воды 1 000 кг/м<sup>3</sup>.

118. В капилляре, находящемся на поверхности Земли, жидкость поднялась на высоту 12 мм. Определите высоту поднятия столба этой жидкости в том же капилляре на поверхности Луны. Ускорение свободного падения на поверхности Луны принять равным 0,165 от земного.

### **Вопросы для устного зачета по теме «Тепловые явления»**

Объясните явление (почему так происходит) с точки зрения физики.

1. Приведите примеры тепловых явлений (не менее трех).

2. Почему врач, поставив больному медицинский термометр, смотрит его показания не раньше, чем через 5–7 минут?

3. В каком стакане чай заварится быстрее: в котором налита горячая или холодная вода?

4. Почему в электрических чайниках имеется верхняя отметка (max), выше которой не рекомендуется наливать воду?

5. Почему мы чувствуем запахи, которые доносятся из кухни, когда мы находимся в другой комнате?

6. Почему пила (сверло дрели) при работе сильно нагреваются?

7. Зачем водопроводные трубы закапывают в землю на достаточную глубину?

8. Зачем у кастрюль (сковородок) делают деревянные ручки?

9. Почему можно обжечься, когда пьешь горячий чай из металлической кружки?

10. Зачем в странах Средней Азии местные жители во время сильной жары носят шапки-папахи и ватные халаты?

11. Греет ли шуба?

12. Почему весной снег в городе тает раньше, чем в лесу?

13. В каком платье летом менее жарко: светлом или темном?

14. Можно ли термос использовать для хранения мороженого?

15. Летом при выходе из реки мы ощущаем холод. Почему?

16. Почему на окнах в автобусе в сильные морозы появляется лед (узор)?

17. Почему фрукты, вынутые из холодильника, запотевают?

18. Почему электрические провода между столбами в разное время года имеют различную длину (провисают)?

19. Зачем между железнодорожными рельсами при их укладке оставляют зазор?

20. Один кувшин с молоком поставили в холодильник, другой оставили в комнате. Где сливки (жирное молоко) отстоятся быстрее?

21. Почему при комнатной температуре металлические вещи на ощупь кажутся холоднее, чем те, которые изго-

товлены из дерева? При какой температуре они будут казаться одинаково нагретыми?

22. Почему ложка, опущенная в горячий чай, нагревается?

23. В каком случае горячая кастрюля охладится быстрее: если лед разместить под нее или положить на крышку?

24. Как спасаются зимующие животные, птицы в сильные морозы?

25. Почему под достаточно высоким снегом не вымерзают озимые посадки?

26. Весной для сохранения от возвратных заморозков рассаду укрывают тонкой прозрачной пленкой. Объясните за чем.

27. Почему зимой, купаясь в проруби (горячие источники), люди не испытывают сильного охлаждения?

28. Почему летним вечером над озером иногда появляется туман?

29. Вы собрались позавтракать и налили в стакан чай (кофе). Позвонил телефон, и Вы отвлеклись. Как следует поступить, чтобы чай остался горячим: налить в него молоко перед уходом или по возвращении?

30. В холодных помещениях у нас чаще мерзнут ноги. Почему?

31. В какой обуви ноги мерзнут сильнее: свободной или плотной?

32. Почему в ясные зимние ночи мороз сильнее, чем в облачную погоду?

33. Почему не рекомендуют оставлять жидкости на морозе в стеклянной посуде?

# ТЕРМОДИНАМИКА

## Основы термодинамики

**Термодинамика** — это наука о наиболее общих тепловых свойствах макроскопических тел. Термодинамический подход не требует каких-либо конкретных предположений о строении вещества, поэтому выводы термодинамики имеют универсальный характер. Законы термодинамики справедливы для всех тел независимо от их внутреннего строения.

**Термодинамическая система** — это совокупность макроскопических тел, которые могут взаимодействовать между собой и другими телами (внешней средой).

Термодинамическая система состоит из настолько большого числа структурных частиц (атомов и молекул), чтобы ее состояние можно было характеризовать макроскопическими параметрами — плотностью, давлением, концентрацией веществ, образующих систему, и т.д. Термодинамическая система находится в равновесии, если ее параметры не меняются во времени и в системе нет потоков энергии и вещества. Для равновесных термодинамических систем вводится понятие температуры как параметра состояния, имеющего одинаковое значение для всех макроскопических частей системы. Термодинамические системы, не обменивающиеся с другими системами ни энергией, ни веществом, называются изолированными. Если система не изолирована, то ее состояние может меняться; изменение состояния системы называется термодинамическим процессом [10].

**Внутренняя энергия системы.** Все макроскопические тела наряду с механической энергией обладают также энергией, зависящей от внутреннего состояния тел. Эту энергию называют внутренней. С точки зрения молекулярно-



кинетической теории *внутренняя энергия* макроскопического тела равна сумме кинетических энергий *хаотического* движения всех молекул (или атомов) и потенциальных энергий взаимодействия молекул *друг с другом* (но не с молекулами других тел). Внутренняя энергия идеального газа равна *кинетической энергии* хаотического движения молекул, поскольку потенциальная энергия взаимодействия молекул равна нулю. Одноатомными являются инертные газы гелий, неон, аргон и др. С точки зрения механики одноатомный газ представляет собой систему частиц, которые совершают только поступательное движение.

Внутренняя энергия одноатомного газа равна:

$$U = \frac{3}{2} N_A kT = \frac{3}{2} \vartheta RT.$$

Молекулы двух- (и более) атомных газов могут совершать и другие виды движения — вращательное и колебательное, — с которыми тоже связана определенная энергия.

Внутренняя энергия такого газа будет отличаться коэффициентом:

$$U = \frac{5}{2} \vartheta RT.$$

Как видно, для вычисления внутренней энергии важно уточнить, какой это газ — одно- или двухатомный. В общем виде формула может быть записана так:

$$U = \frac{i}{2} \vartheta RT,$$

где  $i$  — коэффициент, принимающий значения 3, 5 и др. в зависимости от условия задачи.

Различают работу  $A$ , которую совершает система над внешними телами, и работу  $A'$ , которая совершается внешними телами над системой. Работа  $A$  принимается положительной, работа  $A'$  — отрицательной, причем  $A = -A'$ .

Рассмотрим работу расширения газа, то есть работу, которую газ совершает против внешнего давления, создаваемого поршнем. Элементарная работа определяется формулой

$$A = P \cdot \Delta V.$$

При расширении газ совершает положительную работу против внешних сил ( $\Delta V > 0$ ). При сжатии газа совершается отрицательная работа ( $\Delta V < 0$ ). Она совершается теми внешними телами, которые создали внешнее давление.

**Понятие об адиабатическом процессе.** Адиабатическим процессом называется термодинамический процесс, который осуществляется в системе без теплообмена ее с внешними телами. При адиабатическом процессе теплоемкость вещества равна нулю ( $\Delta Q = 0$ ).

### Первый закон термодинамики

**Количество теплоты, полученное системой, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение системой работы против внешних сил:**

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

### Применение первого закона термодинамики к изопроцессам

Внутренняя энергия идеального газа в *изотермическом* процессе не меняется, поскольку  $\Delta T = 0$  и  $\Delta U = 0$ . Вся подведенная теплота расходуется на работу газа против внешнего давления.

При *изохорном* процессе количество теплоты  $\Delta Q$  идет только на увеличение внутренней энергии газа, поскольку работу газ не совершает.

При *изобарном* процессе количество теплоты, подводимое к газу, расходуется и на увеличение внутренней энер-

гии, и на работу расширения, которую совершает газ против внешнего давления.

При адиабатическом процессе в отсутствие теплообмена с внешней средой работа, которую совершает газ против внешнего давления, происходит за счет убыли его внутренней энергии. Адиабатически расширяющийся идеальный газ охлаждается [4].

### **Основные формулы**

ТЕРМОДИНАМИКА	
$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \cdot T$	внутренняя энергия идеального газа
$Q = c \cdot m \cdot (t_2 - t_1)$	количество теплоты, поглощаемое/выделяемое при изменении температуры
$Q = \lambda \cdot m$	количество теплоты в процессе плавления
$Q = r \cdot m$	количество теплоты в процессе парообразования
$Q = q \cdot m$	количество теплоты, выделяемое при полном сгорании топлива
$A = P \cdot \Delta V$	работа, совершенная газом
$Q = \Delta U + A'$	уравнение первого начала термодинамики
$\sum Q = 0$	уравнение теплового баланса
$\eta = \frac{A}{Q_1}$	КПД теплового двигателя
$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$	КПД идеальной тепловой машины

**Задание.** Определите, изменяется ли значение величины (работа, внутренняя энергия, количество теплоты), запишите итоговый вариант формулы первого закона термодинамики в каждом процессе. Заполните таблицу.

<i>Изопроцесс</i>	<i>Работа</i>	<i>Внутренняя энергия</i>	<i>Количество теплоты</i>	<i>Первый закон термодинамики</i>
Изобарный				
Изохорный				
Изотермический				
Адиабатный				

### **Пример решения**

В баллоне объемом 2 л находится гелий. Внутренняя энергия газа равна 300 Дж. Определите давление в сосуде.

<p><i>Дано:</i></p> <p><math>V = 2 \text{ л} = 0,002 \text{ м}^3</math></p> <p><math>U = 300 \text{ Дж}</math></p> <hr/> <p><i>Найти:</i></p> <p><math>P = ?</math></p>	<p><i>Решение:</i></p> <p><math>PV = \vartheta RT \text{ и } U = \frac{3}{2}\vartheta RT,</math></p> <p><i>тогда</i></p> $U = \frac{3}{2}PV.$ $P = \frac{2U}{3V} = \frac{2 \cdot 300 \text{ Дж}}{3 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 100 \text{ кПа.}$ <p><i>Ответ:</i> 100 кПа.</p>
---	---

**Необратимость процессов в природе.** В термодинамике большую роль играет понятие обратимого процесса. Обратимым процессом называется такое изменение состояния термодинамической системы, которое, будучи проведено в обратном направлении, возвращает ее в исходное состояние так, чтобы система прошла через те же промежуточные состояния, что и в прямом процессе, но в обратной последовательности, а состояние всех тел вне системы, с ко-

торыми она взаимодействовала, осталось в итоге неизменным. Важно, что при совершении обратимого процесса сначала в прямом, а затем в обратном направлении в исходное состояние возвращается не только система, но и все внешние тела, взаимодействовавшие с системой. Необходимым и достаточным условием обратимости термодинамического процесса является его равновесность.

Равновесный процесс — это идеализированный процесс, при проведении которого в каждый момент не нарушается равновесие термодинамической системы. Он может быть представлен как непрерывная последовательность равновесных состояний. Это означает, что процесс должен быть медленным по сравнению с процессами установления термодинамического равновесия в системе. Строго говоря, только бесконечно медленные процессы являются равновесными. Все реальные термодинамические процессы протекают с конечной скоростью и поэтому являются неравновесными. Они сопровождаются трением, диффузией и теплообменом с внешней средой при конечной разности температур системы и внешней среды. Следовательно, *все реальные процессы необратимы* [4].

### **Второй закон термодинамики**

Многочисленные наблюдения позволили установить, что тепловым процессам присуща определенная направленность, которая не вытекает из первого закона термодинамики. Например, в результате теплообмена между поразному нагретыми телами всегда происходит выравнивание их температур, хотя с точки зрения первого закона термодинамики одинаково возможен как переход теплоты от более нагретого тела к менее нагретому, так и обратный переход. Первый закон термодинамики формально допускает

создание вечного двигателя второго рода. Так называется двигатель, в котором рабочее тело, совершая круговой процесс, получает энергию в форме теплоты от одного внешнего тела и целиком передает ее в форме работы другому внешнему телу. Невозможность создания вечного двигателя второго рода является утверждением, вытекающим из обобщения многочисленных опытов. Оно называется **вторым законом термодинамики** и имеет несколько эквивалентных формулировок. Приведем одну из них:

**Невозможен периодический процесс, единственным результатом которого является превращение всей теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу.**

Второй закон термодинамики указывает на необратимость процесса превращения работы в теплоту. В формулировке этого закона особое значение имеют слова «единственным результатом». Запреты, которые накладываются вторым законом термодинамики, снимаются, если процессы, о которых идет речь, не являются единственными. Например, передача тепла от менее нагретого тела более нагретому возможна, если при этом происходит как минимум еще один процесс (в холодильной установке) [4].

### **Физические основы работы тепловых двигателей.**

#### **КПД теплового двигателя**

*Тепловым двигателем* называется устройство, которое превращает внутреннюю энергию топлива в механическую энергию. Энергия, которая выделяется при сгорании топлива, передается путем теплообмена рабочему телу (обычно газу). При расширении рабочего тела совершается работа

против внешних сил и приводится в движение соответствующий механизм [10].

Основой тепловых двигателей являются круговые процессы. Круговым процессом или циклом называется термодинамический процесс, в результате которого рабочее тело возвращается в исходное состояние. На диаграммах состояния ( $pV$ -,  $pT$ -,  $VT$ -диаграммах) циклические процессы изображаются в виде замкнутых кривых.

Работа против внешнего давления, которую совершает рабочее тело в произвольном круговом процессе, измеряется площадью, ограниченной кривой этого процесса на  $pV$ -диаграмме. Прямым циклом называется круговой процесс, в котором рабочее тело совершает положительную работу за счет сообщенной ему теплоты. На  $pV$ -диаграмме прямой цикл изображается замкнутой кривой, которая обходится по часовой стрелке. Обратным циклом называется круговой процесс, в котором над рабочим телом совершается работа и от него отводится эквивалентное количество теплоты. На  $pV$ -диаграмме обратный цикл изображается замкнутой кривой, которая обходится против часовой стрелки. В тепловом двигателе рабочее тело совершает прямой цикл, а в холодильной установке — обратный.

*Циклом Карно* называется прямой обратимый круговой процесс (рис. 23), состоящий из двух изотерм и двух адиабат. При изотермическом расширении (участок 1–2) рабочее тело получает от *нагревателя* — источника энергии с постоянной температурой  $T_1$  — количество теплоты  $Q_1$ . При изотермическом сжатии (участок 3–4) рабочее тело отдает *холодильнику*, имеющему постоянную температуру  $T_2$ , количество теплоты  $Q_2$ . При адиабатических расширении и сжатии энергия к рабочему телу извне не поступает и эти про-

цессы происходят за счет изменения его внутренней энергии [5].

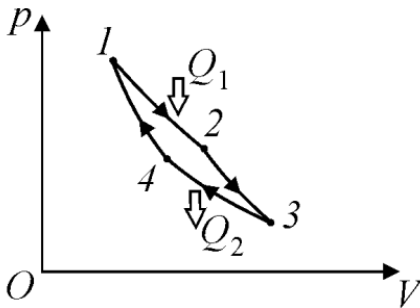


Рис. 23. Цикл Карно

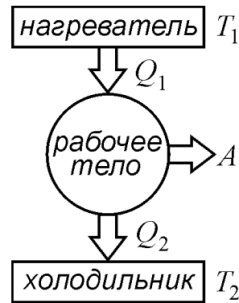


Рис. 24. Схема теплового двигателя

*Коэффициентом полезного действия (КПД)* произвольного цикла называется отношение работы  $A$ , совершенной рабочим телом в прямом цикле, к количеству теплоты  $Q_1$ , сообщенному рабочему телу нагревателем:

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

КПД обратимого цикла Карно не зависит от природы рабочего тела и определяется только температурами нагревателя  $T_1$  и холодильника  $T_2$ :

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Согласно теореме Карно, КПД произвольного обратимого цикла не может превышать КПД обратимого цикла Карно, осуществленного с теми же температурами  $T_1$  и  $T_2$  нагревателя и холодильника. КПД произвольного необратимого цикла всегда меньше КПД обратимого цикла Карно, проведенного между температурами  $T_1$  и  $T_2$ .



Любой тепловой двигатель независимо от его конструктивных особенностей состоит из трех основных частей — рабочего тела, нагревателя и холодильника (рис. 24).

Рабочее тело — газ или пар — при расширении совершает работу, получая от нагревателя некоторое количество теплоты  $Q_1$ . Температура  $T_1$  нагревателя остается при этом постоянной за счет сгорания топлива. При сжатии рабочее тело передает некоторое количество теплоты  $Q_2$  холодильнику — телу постоянной температуры  $T_2$ , меньшей, чем  $T_1$ . Давление газа при сжатии ниже, чем при расширении, что обеспечивает полезную работу двигателя.

Реальные тепловые двигатели работают по разомкнутому циклу: после расширения газ выбрасывается и сжимается новая порция. Однако тепловые процессы в рассмотренном выше замкнутом цикле, когда сжимается и расширяется одна и та же порция газа, являются хорошей аппроксимацией для процессов в реальном двигателе и могут быть использованы для расчета его КПД [4].

### ***Задачи для самостоятельного решения***

119. Для изобарного нагревания 800 моль газа на 500 К ему сообщили 9,4 МДж теплоты. Определите работу газа и изменение его внутренней энергии.

120. Одноатомный идеальный газ массой 20 г при расширении без теплообмена совершил работу 249 Дж. На сколько градусов изменилась температура газа? Молярная масса газа 0,04 кг/моль.

121. Как и на сколько изменилась внутренняя энергия газа, если при его адиабатном сжатии над ним была совершена работа 200 Дж?

122. Какую работу совершил идеальный одноатомный газ и как при этом изменилась его внутренняя энергия при

изобарном нагревании двух молей газа на 50 К? Какое количество теплоты получил газ в процессе теплообмена?

123. При изобарном охлаждении на 100 К внутренняя энергия одноатомного идеального газа уменьшилась на 1 662 кДж. Рассчитайте работу, которую совершил при этом газ, и определите количество теплоты, которое было им передано окружающим телам.

124. При подведении к двум молям одноатомного идеального газа 300 Дж теплоты его температура увеличилась на 10 К. Какую работу при этом совершил газ?

125. В сосуде емкостью 5 л находится гелий под давлением 0,3 МПа. Какова внутренняя энергия  $U$  газа в сосуде?

126. Найти работу  $A$ , совершенную идеальным газом в ходе процесса (рис. 25). В состоянии 1 давление газа равно  $p_0 = 10^5$  Па, а объем  $V_0 = 1$  л. В состоянии 2 давление газа вдвое меньше, а объем вдвое больше. Процесс 2–3 представляет собой изобарное расширение до объема  $4V_0$ .

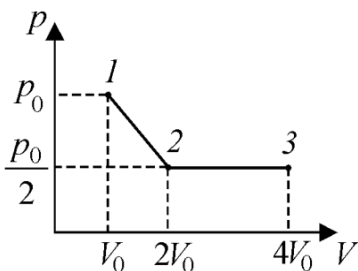


Рис. 25. К условию задачи 126

127. Внутренняя энергия термодинамической системы уменьшилась на 40 кДж, при этом система совершила работу против внешних сил 35 кДж. Какое количество теплоты получит или отдаст при этом система?

128. Газ изобарно перешел из состояния 1 с давлением  $10^5$  Па и объемом  $0,1$  м<sup>3</sup> в состояние 2 с объемом  $0,2$  м<sup>3</sup>, а за-

тем изохорно перешел в состояние 3 с давлением  $3 \cdot 10^5$  Па. Найдите всю совершенную работу при переходе из состояния 1 в состояние 3.

129. Идеальный одноатомный газ находится в сосуде объемом  $0,6 \text{ м}^3$  под давлением 2 кПа. Чему равна его внутренняя энергия?

130. При адиабатном расширении газ совершил работу 2 МДж. Чему равно изменение внутренней энергии газа? Как она изменилась?

131. Для изобарного нагревания на 500 К одноатомному газу в количестве 800 моль сообщили 9,4 МДж тепла. Определите работу газа и изменение его внутренней энергии.

132. Газ в идеальном тепловом двигателе отдает холодильнику 60 % теплоты, полученной от нагревателя. Какова температура нагревателя, если температура холодильника 200 К?

133. Какое количество теплоты необходимо сообщить одному молю идеального одноатомного газа, находящемуся в закрытом баллоне при температуре  $33^\circ\text{C}$ , чтобы повысить его давление в 3 раза?

134. На рисунке изображен круговой процесс (рис. 26) в термодинамической системе. Определите, чему равна работа, совершенная в этом процессе.

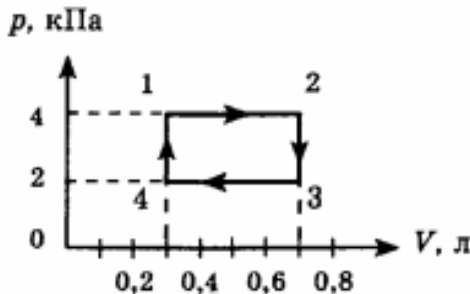


Рис. 26. К условию задачи 134

135. Какова внутренняя энергия 10 моль одноатомного газа при 15 °С?

136. Азот массой 280 г был нагрет при постоянном давлении на 100 °С. Определите работу, которую совершает газ при расширении.

137. Сравните внутренние энергии аргона и гелия при одинаковой температуре. Считать массы газов равными.

138. Определите работу, которую совершил 1 кг углекислого газа при изобарном нагревании от 268 К до 400 К.

139. Какова внутренняя энергия одноатомного газа, занимающего при температуре 400 К объем 2,5 л, если концентрация его молекул  $10^{20} \text{ см}^{-3}$  ?

140. Газ, расширяясь изобарно при давлении  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , совершает работу 200 Дж. Определите первоначальный объем газа, если его конечный объем оказался равным 2,5 л.

141. Чему равен максимальный КПД идеального теплового двигателя, если температура нагревателя равна 455 °С, а холодильника 273 °С ?

142. В цилиндре объемом 24 л находится газ, который изобарно расширяется под давлением  $5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Каков конечный объем газа, если при его расширении совершается работа в 1,5 кДж?

143. Тепловой двигатель совершает за цикл работу 100 Дж. Какое количество теплоты получено при этом от нагревателя, если КПД двигателя 20 %?

144. Максимальный КПД идеального теплового двигателя равен 20 %. Найдите температуру нагревателя, если температура холодильника 25 °С.

145. Определите КПД теплового двигателя, если количество теплоты, полученное от нагревателя, в 4 раза превышает количество теплоты, отданное холодильнику.

146. Определите КПД идеального теплового двигателя, если температура нагревателя 400 К, а холодильника 300 К.

147. КПД теплового двигателя равен 15 %. Какое количество теплоты передано от нагревателя рабочему телу за время, в течение которого совершена работа 150 Дж?

148. Какова разность температур нагревателя и холодильника идеального теплового двигателя, если температура нагревателя равна 400 К, а максимальное значение КПД равно 20 %?

149. Во сколько раз увеличится КПД идеального теплового двигателя, если температура нагревателя повысится от 400 до 600 К? Температура холодильника 300 К.

150. Определите КПД теплового двигателя, если количество теплоты, полученное от нагревателя за цикл, равно 500 Дж, а количество теплоты, отданное холодильнику за цикл, составляет 400 Дж.

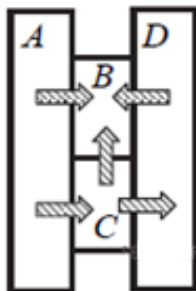
151. Температуры нагревателя и холодильника идеальной тепловой машины соответственно равны 117 °С и 27 °С. Количество теплоты, получаемое от нагревателя за 1 с, равно 60 кДж. Вычислите КПД машины, количество теплоты, отдаваемое холодильнику за 1 с, и мощность машины.

## ИТОГОВАЯ КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

**Задание 1.** Чем отличается внутреннее строение твердых, жидких и газообразных тел?

**Задание 2.** Какое количество вещества содержится в объеме  $8,3 \text{ м}^3$  при давлении  $500 \text{ Па}$  и температуре  $250 \text{ К}$ ?

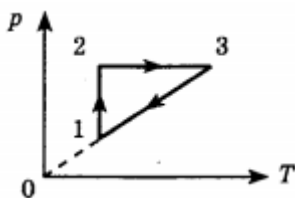
**Задание 3.** Дайте определение «Диффузия». В каких агрегатных состояниях возможна диффузия? Приведите примеры диффузии в быту.



**Задание 4.** Четыре металлических бруска (A, B, C и D) положили вплотную друг к другу, как показано на рисунке. Стрелки указывают направление теплопередачи от бруска к бруску. Температуры брусков в данный момент равны  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какой из брусков имеет температуру  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

**Задание 5.** Чему равна внутренняя энергия 5 моль одноатомного газа при  $17 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

**Задание 6.** Определите КПД теплового двигателя, если количество теплоты, полученное от нагревателя, в 5 раз превышает количество теплоты, отданное холодильнику.



**Задание 7.** На рисунке дан график изменения состояния идеального газа в координатах РТ. Постройте этот график в других координатах РV.

**Задание 8.** Чему равна концентрация молекул идеального одноатомного газа в сосуде объемом  $2 \text{ л}$  при температуре  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ , если внутренняя энергия его равна  $300 \text{ Дж}$ ?

**Задание 9.** Пузырек воздуха всплывает со дна пруда на поверхность, его объем увеличился в 1,5 раза. Вычислите глубину пруда, считая температуру постоянной, а атмосферное давление равным 100 кПа. Плотность воды 1000 кг/м<sup>3</sup>.

**Задание 10.** Металлический шар массой 2 кг упал на свинцовую пластину массой 1 кг и остановился. При этом пластина нагрелась на 3,2 °С. С какой высоты упал шар, если на нагревание пластины было потрачено 80% выделившегося при ударе количества теплоты?

**Задание 11.** Почему в пустынях днем жарко, а ночью температура падает ниже 0 °С?

**Задание 12.** Почему стоградусный пар обжигает сильнее, чем вода той же температуры?

**Задание 13.** Определите число атомов в 1 м<sup>3</sup> меди. Молярная масса меди 0,0635 кг/моль, плотность 8 900 кг/м<sup>3</sup>.

**Задание 14.** Установите соответствие между примерами и физическими явлениями, которые эти примеры иллюстрируют.

ПРИМЕРЫ	ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
А. Стерилизация медицинских инструментов в автоклаве под давлением выше атмосферного.	1) кипение жидкости при пониженном давлении; 2) охлаждение под действием ветра; 3) парообразование с поверхности тела, происходящее с поглощением энергии;
Б. Ощущение холода после купания, душа	4) парообразование при повышенном давлении и высоких температурах

**Задание 15.** Полярник для получения воды использует лед 7 кг при температуре –20 С. Сколько тепла потребуется, чтобы вскипятить воду. Потерями пренебречь.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в пособии материалы тщательно отобраны и систематизированы в соответствии с требованиями современных образовательных стандартов, что позволяет студенту самостоятельно справиться с большим объемом учебной информации. Изложение материала соответствует курсу лекций, это способствует глубокому осмыслению обучающимися информации, получаемой в процессе слушания лекции и ведения конспекта. Пособие может быть использовано как на учебных занятиях, так и при самостоятельной подготовке. Задания и контрольные вопросы к отдельным главам пособия, а также зачетные требования служат для закрепления теоретических знаний и выработки навыков по их применению.

Содержание курса уже несколько лет апробируется в рамках занятий со студентами очного отделения колледжа ЮУрГГПУ по направлениям подготовки «Преподавание в начальных классах», «Дошкольное образование», «Специальное дошкольное образование», «Физическая культура».

Автор с благодарностью примет замечания и предложения от читателей, интересующихся физикой.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кабардин О.Ф. История физики и развитие представлений о мире: элективный курс: 10–11-й класс: учеб. пособие / О.Ф. Кабардин. – Москва: АСТ: Астрель: Транзиткнига, 2005. – 318 с. – ISBN 5-17-029247-3.
2. Карпушев А.В. Физический практикум: учебно-методическое пособие / А.В. Карпушев. – Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2015. – 218 с. – ISBN 978-5-906777-34-8.
3. Квант: научно-популярный физико-математический журнал [сайт]. – URL: [www.kvant.mcsme.ru](http://www.kvant.mcsme.ru) (дата обращения: 13.08.2022).
4. Образовательные ресурсы Интернета — Физика: [сайт]. – URL: [www.alleng.ru/edu/phys.htm](http://www.alleng.ru/edu/phys.htm) (дата обращения: 22.11.2022).
5. Опорные конспекты и разноуровневые задания. Физика. 10 класс / Е.А. Марон. – Санкт-Петербург: Виктория плюс, 2018. – 80 с. – ISBN 978-5-91673-022-7.
6. Подготовка к ЕГЭ: [сайт]. – URL: [www.college.ru/fizika](http://www.college.ru/fizika) (дата обращения: 22.05.2022).
7. Сборник задач по физике. 10–11 классы / Е.Г. Московкина, В.А. Волков. – Москва: ВАКО, 2019. – 320 с. – ISBN 978-5-408-04332-3.
8. Сборник задач по физике. 10–11 классы: пособие для учащихся общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни / Н.А. Парфентьева. – Москва: Просвещение, 2010. – 206 с. – ISBN 978-5-09-024561-6.
9. Физика. 10 класс: дидактические материалы / А.Е. Марон, Е.А. Марон. – Москва: Дрофа, 2007. – 145 с. – ISBN 978-5-358-14560-3.
10. Физика. 10 класс: учеб. для общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни / Г.Я. Мякишев, Б.Б. Буховцев, Н.Н. Сотский. – Москва: Просвещение, 2014. – 366 с. – ISBN 978-5-09-028225-3.
11. Физика. Сборник задач: учеб. пособие для ссузов / Т.И. Трофимова, А.В. Фирсов. – Москва: Дрофа, 2007. – 303 с. – ISBN 978-5-358-01674-3.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Универсальные физические постоянные

Название	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Ускорение свободного падения	$g$	$9,81 \approx 10$	$\frac{м}{с^2}$
Гравитационная постоянная	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11}$	$\frac{Н \cdot м}{кг^2}$
Универсальная газовая постоянная	$R$	8,31	$\frac{Дж}{К \cdot моль}$
Число Авогадро	$N_A$	$6,02 \cdot 10^{23}$	$\frac{1}{моль}$
Постоянная Больцмана	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$	$\frac{Дж}{К}$
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$	кг
Масса покоя электрона	$m_e$	$9,1 \cdot 10^{-31}$	кг
Масса покоя протона	$m_p$	$1,67 \cdot 10^{-27}$	кг
Масса покоя нейтрона	$m_n$	$1,68 \cdot 10^{-27}$	кг
Элементарный электрический заряд	$e$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Скорость света в вакууме	$c$	$3 \cdot 10^8$	$\frac{м}{с}$

## Приложение 2

### Соотношения между единицами

#### **1. Единицы длины**

$$1 \text{ см} = 10 \text{ мм}$$

$$1 \text{ дм} = 10 \text{ см} = 100 \text{ мм}$$

$$1 \text{ м} = 100 \text{ см} = 1\,000 \text{ мм}$$

$$1 \text{ км} = 1\,000 \text{ м} = 100\,000 \text{ см} = 1\,000\,000 \text{ мм}$$

$$1 \text{ дюйм} = 25,4 \text{ мм} = 2,54 \text{ см}$$

#### **2. Единицы площади**

$$1 \text{ мм}^2 = 0,000001 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ см}^2 = 0,0001 \text{ м}^2$$

$$1 \text{ дм}^2 = 0,01 \text{ м}^2 = 100 \text{ см}^2$$

$$1 \text{ км}^2 = 1\,000\,000 \text{ м}^2$$

#### **3. Единицы объема**

$$1 \text{ мл} = 10^{-3} \text{ л} = 0,001 \text{ л}$$

$$1 \text{ л} = 0,001 \text{ м}^3$$

$$1 \text{ мм}^3 = 10^{-9} \text{ м}^3$$

$$1 \text{ см}^3 = 10^{-6} \text{ м}^3$$

$$1 \text{ дм}^3 = 1 \text{ л}$$

$$1 \text{ м}^3 = 1\,000 \text{ л}$$

#### **4. Единицы массы**

$$1 \text{ кг} = 1\,000 \text{ г}$$

$$1 \text{ ц} = 100 \text{ кг}$$

$$1 \text{ т} = 1\,000 \text{ кг}$$

$$1 \text{ мкг} = 1/1\,000 \text{ мг} = 0,001 \text{ мг}$$

$$1 \text{ мг} = 1/1\,000 \text{ г} = 0,001 \text{ г}$$

$$1 \text{ фунт} = 16 \text{ унций} = 453,59237 \text{ г}$$

### 5. Единицы времени

1 мин = 60 сек

1 час = 60 мин = 3 600 сек

1 сутки = 24 часа = 1 440 мин = 86 400 сек

1 неделя = 7 суток = 168 ч = 10 080 мин = 604 800 сек

1 год = 365 суток = 8 760 ч = 525 600 мин = 31 536 000 сек

### 6. Единицы скорости

$$1 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = 1 \frac{1000 \text{ м}}{3600 \text{ с}} = 1 \frac{10 \text{ м}}{36 \text{ с}} \approx 0,28 \text{ м/с}$$

### 7. Единицы давления

1 мм рт. ст. = 133,3 Па

1 атм = 101 325 Па

1 бар = 10 кПа

### Приставки

Дольные		Кратные	
<b>д</b> (деци)	$0,1 = 10^{-1}$	<b>г</b> (гекто)	$100 = 10^2$
<b>с</b> (санти)	$0,01 = 10^{-2}$	<b>к</b> (кило)	$1\,000 = 10^3$
<b>м</b> (милли)	$0,001 = 10^{-3}$	<b>М</b> (Мега)	$1\,000\,000 = 10^6$
<b>мк</b> (микро)	$0,000\,001 = 10^{-6}$	<b>Г</b> (Гига)	$1\,000\,000\,000 = 10^9$
<b>н</b> (нано)	$0,000\,000\,001 = 10^{-9}$	<b>Т</b> (Тера)	$1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$

Приложение 3

Периодическая система химических элементов  
Д.И. Менделеева

Период	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В										VIII			
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII						
Ряд	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			VIII			
I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12		
II	Li Литий	Be Бериллий	B Бор	C Углерод	N Азот	O Кислород	F Фтор	Ne Неон	He Гелий	Обозначение элемента Атомный номер Li 3 Литий 6,939				
III	Na Натрий	Mg Магний	Al Алюминий	Si Кремний	P Фосфор	S Сера	Cl Хлор	Ar Аргон	Относительная атомная масса					
IV	K Калий	Ca Кальций	Sc Скандий	Ti Титан	V Ванадий	Cr Хром	Mn Марганец	Fe Железо	Co Кобальт	Ni Никель				
V	29 63,546	Cu Медь	Zn Цинк	Ga Галлий	Ge Германий	As Мышьяк	Se Селен	Br Бром	Kr Криптон					
	47 107,868	Ag Серебро	Cd Кадмий	In Индий	Sn Олово	Sb Сурьма	Te Теллур	I Йод	Xe Ксенон					
VI	80 196,967	Au Золото	Hg Ртуть	Tl Таллий	Pb Свинец	Bi Висмут	Po Полоний	At Астат	Rn Радон					
	88 226	Ra Радий	Ac** Актиний	Rf Резерфордий	Db Дубний	Sg Сборгбий	Bh Борий	Hs Хассий	Mt Мейтнерий					
VII	58 140,12	Ce Церий	Nd Неодим	Pm Прометий	Sm Самарий	Eu Европий	Gd Гадолиний	Tb Тербий	Dy Диспрозий	Ho Гольмий	Er Эрбий	Tm Тулий	Yb Иттербий	Lu Лютеций
	90 232,038	Th Торий	Pa Протактиний	U Уран	Np Нептуний	Am Америций	Cm Кюрий	Bk Берклий	Cf Калифорний	Es Эйнштейний	Fm Фермий	Md Менделеев	No Нобелий	Lr Лоренций

## Приложение 4

### Табличные значения некоторых величин

#### *Плотность*

Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Ртуть	13 600	Медь, никель	8 900
Вода	1 000	Железо, сталь	7 800
Вода морская, молоко	1 030	Цинк	7 100
Подсолнечное масло	900	Чугун	7 000
Керосин, нефть	800	Алюминий, мрамор	2 700
Спирт	800	Стекло	2 500
Бензин	710	Кирпич	1 800
Воздух	1,29	Пластмасса	1 200
Гелий	0,18	Лед	900
Водород	0,09	Древесина сухая	400

#### *Удельная теплоемкость*

Вещество	$c$ , Дж/(кг·°С)	Вещество	$c$ , Дж/(кг·°С)
Вода	4 200	Алюминий	920
Молоко	3 900	Стекло	840
Спирт	2 500	Чугун	500
Эфир	2 350	Железо	460
Керосин	2 100	Медь, цинк, латунь	400
Лед	2 100	Свинец, золото	130

#### *Удельная теплота сгорания топлива*

Вещество	$q$ , 10 <sup>6</sup> Дж/кг	Вещество	$q$ , 10 <sup>6</sup> Дж/кг
Сухая древесина	10	Бензин, керосин	46
Каменный уголь	27	Природный газ	44
Древесный уголь	34	Водород	120
Спирт	27	Дизельное топливо	42

**Удельная теплота и температура плавления  
(кристаллизации)**

Вещество	$\lambda$ , Дж/кг	$t$ пл, °С
Свинец	$25 \cdot 10^3$	327
Олово	$59 \cdot 10^3$	232
Сталь	$84 \cdot 10^3$	1 500
Цинк	$120 \cdot 10^3$	420
Лед	$340 \cdot 10^3$	0
Водород	$60 \cdot 10^3$	-259
Ртуть	$12 \cdot 10^3$	-39
Спирт	$110 \cdot 10^3$	-114
Алюминий	$390 \cdot 10^3$	660

**Удельная теплота парообразования  
и температура кипения (при н.у. \*)**

Вещество	$L$ , Дж/кг	$t$ кип, °С	Вещество	$L$ , Дж/кг	$t$ кип, °С
Вода	$2,3 \cdot 10^6$	100	Свинец	$0,88 \cdot 10^6$	1600
Эфир	$0,4 \cdot 10^6$	35	Водород	$0,45 \cdot 10^6$	-253
Спирт	$0,9 \cdot 10^6$	78	Азот	$0,21 \cdot 10^6$	-196

**Молярная масса**

Вещество	$M$ , кг/моль	Вещество	$M$ , кг/моль
Азот	$28 \cdot 10^{-3}$	Гелий	$4 \cdot 10^{-3}$
Аргон	$40 \cdot 10^{-3}$	Кислород	$32 \cdot 10^{-3}$
Водород	$2 \cdot 10^{-3}$	Литий	$6 \cdot 10^{-3}$
Воздух	$29 \cdot 10^{-3}$	Неон	$20 \cdot 10^{-3}$
Вода	$18 \cdot 10^{-3}$	Углекислый газ	$44 \cdot 10^{-3}$

\*н.у. – нормальные условия: давление =  $10^5$  Па; температура = 0 °С

### Темы сообщений по физике

1. Агрегатные состояния вещества.
2. Актуальные проблемы физики атмосферы.
3. Анизотропия кристаллов.
4. Аномальные свойства воды.
5. Артериальное давление.
6. Атмосферное давление в жизни человека.
7. Биофизика человека.
8. В погоне за циклом Карно.
9. В чем секрет термоса?
10. Вакуум. Энергия физического вакуума.
11. Взаимные превращения жидкостей и газов. Фазовые переходы.
12. Взвешивание воздуха.
13. Влажность воздуха и ее влияние на жизнедеятельность человека.
14. Возобновляемые источники энергии.
15. Двигатель внутреннего сгорания.
16. Диффузия в жизни человека.
17. Жидкие кристаллы.
18. Значение паровой машины в жизни человека.
19. Испарение в природе и технике.
20. Особенности действия законов физики в космосе, на МКС.
21. Открытия ученых за последние 20 лет в области физики.
22. Плазма.
23. Сегнерово колесо.
24. Современные вопросы физики XXI века.
25. Физика удивительных природных явлений.



### **Требования к оформлению различных видов самостоятельной работы**

#### *4.1. Методические рекомендации по составлению презентаций*

На первом слайде размещается: название презентации, сведения об авторе (ФИО, номер группы), название образовательной организации, год.

На втором слайде указывается содержание работы. Чтобы презентация была интерактивной, содержание работы рекомендуется оформить в виде гиперссылок.

На последнем слайде указывается список использованной литературы в соответствии с предъявляемыми требованиями, интернет-ресурсы указываются в последнюю очередь.

#### *Оформление слайдов*

Необходимо соблюдать единый стиль оформления, при этом стоит избегать стилей, которые будут отвлекать от содержания презентации. Вспомогательная информация (управляющие кнопки) не должна преобладать над основной информацией (текст, рисунки).

Для фона выбираются более холодные тона (синий или зеленый).

На одном слайде рекомендуется использовать не более трех цветов: один для фона, один для заголовков, один для текста. Для фона и текста используются контрастные цвета (белый фон – черный текст).

Особое внимание следует обратить на цвет гиперссылок (до и после использования).

Нужно использовать возможности компьютерной анимации для представления информации на слайде, но не стоит злоупотреблять различными анимационными эффектами; анимационные эффекты не должны отвлекать внимание от содержания информации на слайде.

### *Представление информации*

Следует использовать короткие слова и предложения. Заголовки должны привлекать внимание аудитории. Предпочтительно горизонтальное расположение информации; наиболее важная информация должна располагаться в центре экрана; если на слайде располагается иллюстрация, надпись должна располагаться под ней.

Для заголовков рекомендуется использовать шрифты не менее 24 пт.; для остальной информации не менее 18 пт. Шрифты без засечек легче читать с большого расстояния. Нельзя смешивать разные типы шрифтов в одной презентации.

Следует использовать:

- для выделения – жирный шрифт, курсив или подчеркивание;

- для иллюстрации наиболее важных фактов – рамки, границы, заливку, штриховку, стрелки, рисунки, диаграммы, схемы. Не допускается неумеренное использование прописных букв (они читаются хуже, чем строчные).

Не стоит заполнять один слайд слишком большим объемом информации: оптимально для запоминания изложить не более трех фактов, выводов, определений. Наиболее эффективно размещение на одном слайде одного ключевого пункта.

Для обеспечения разнообразия следует использовать разные виды слайдов: с текстом, таблицами, диаграммами.

## 4.2. Методические рекомендации по оформлению докладов, сообщений, рефератов

Доклады, сообщения, рефераты имеют следующие части:

- титульный лист;
- оглавление (отражает план работы);
- введение;
- основную часть (главы и параграфы);
- заключение;
- библиографический список;
- приложение.

Каждая часть начинается с новой строки.

Все заголовки одного уровня оформляются одинаково. Заголовки «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Приложения», «Библиографический список», а также заголовки глав и параграфов выделяются полужирным шрифтом.

Список библиографических источников оформляется под заголовком «Библиографический список» в соответствии с ГОСТом Р 7.0.100–2018. Он должен включать все использованные источники (монографии, учебники, пособия, справочники и т. д.). Сведения о книгах должны содержать: фамилию и инициалы автора, заглавие книги, место издания, издательство, год издания. Приведенные библиографические источники должны быть отсортированы в алфавитном порядке. Список должен состоять не менее, чем из трех источников последних 5–7 лет.

Приложения оформляются на отдельных листах, каждое приложение имеет порядковый номер и тематический заголовок. Надпись «Приложение 1» оформляется в правом верхнем углу.

Примерный объем работы – 10 листов А4 машинописного текста (без учета оглавления, библиографического списка и приложения).

Текст рукописи печатается шрифтом Times New Roman, размер 14, междустрочный интервал – 1,5.

Поля: слева – 3 см, справа – 1 см, сверху и снизу – 2 см.

Красная строка – 1,25 см. Интервал между абзацами не добавлять.

Цитаты в тексте работы заключаются в кавычки («...»). После цитаты оформляется ссылка на ее источник, например: [1, с. 10], где номер библиографического источника берется из библиографического списка.

Обращение к тексту приложения оформляется в виде ссылки следующим образом: (прил. 1).

Оформление схем алгоритмов, таблиц и формул. Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) могут быть в основном тексте реферата и в приложении. Все иллюстрации именуется рисунками. Все рисунки, таблицы и формулы нумеруются арабскими цифрами и имеют сквозную нумерацию в пределах приложения. Все рисунки и таблицы должны иметь название. Название рисунка (подпись) располагается под рисунком с обозначением рис. (Рис. 1. Схема движения), пишется с заглавной буквы. Точка после названия рисунка не ставится.

Название таблицы помещается над таблицей. В тексте работы на все рисунки и таблицы должны быть ссылки: на рисунке 1 (рис. 1) или в таблице 1 (табл. 1).

Номера страниц обозначаются арабскими цифрами, в нижнем правом углу страницы. Номер ставится на странице, начиная со страницы оглавления (с. 2). В работе используется сквозная нумерация до последней страницы.

В оглавлении указываются начальные страницы всех частей работы, приводятся полные названия глав со словом «Глава». Части работы «Введение», «Заключение», «Библиографический список» не нумеруются.

В основном тексте заголовки пишутся сверху по центру, без кавычек, точка после заголовков не ставится.

Названия глав, заголовки «Введение», «Заключение», «Библиографический список» располагаются с новой страницы; названия параграфов – на текущей странице.

Ниже приведены образцы оформления титульного листа, листа оглавления, примеры оформления различных источников в библиографическом списке.

**Образец оформления титульного листа работы**



**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования**

**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГУМАНИТАРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ»)**

**Колледж ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ»**

**ФИЗИКА УДИВИТЕЛЬНЫХ ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ**

**Реферат**

**Специальность 44.02.02 Преподавание в начальных классах**

Дата сдачи: \_\_\_\_\_

Оценка \_\_\_\_\_

Подпись руководителя  
\_\_\_\_\_

Выполнил(а):

студентка группы ОФ-218-165-3-1

Голубева Виктория Валерьевна

Научный руководитель:

преподаватель колледжа

Селезнева Евгения Александровна

**Челябинск**

**2023**

## *Пример оформления оглавления работы*

### **Оглавление**

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Название</b> .....	5
1.1. ....	5
1.2. ....	9
1.3. ....	12
Выводы по главе 1 .....	14
<b>Глава 2. Название</b> .....	16
2.1. ....	16
2.2. ....	18
2.3. ....	20
Выводы по главе 2 .....	22
<b>Заключение</b> .....	24
<b>Библиографический список</b> .....	26
<b>Приложения</b> .....	28

## ***Примеры оформления библиографического описания в библиографическом списке***

Библиографические описания в списке использованной литературы (Библиографический список) должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100-2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание».

Сокращения в библиографическом описании выполняются по ГОСТ Р 7.0.12-2011 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на русском языке» и ГОСТ 7.11-2004 «Библиографическая запись. Сокращение слов и словосочетаний на иностранных европейских языках». Ссылки в тексте работы оформляются по ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка».

Не сокращаются: заглавия, наименования мест изданий (городов).

### ***Книги одного автора***

Кабардин О.Ф. История физики и развитие представлений о мире: элективный курс: 10–11-й класс: учеб. пособие / О.Ф. Кабардин. – Москва: АСТ: Астрель: Транзиткнига, 2005. – 318 с. – ISBN 5-17-029247-3.

### ***Книги двух/трех авторов***

Пурышева Н.С. Физика. 10 класс. Базовый уровень: учеб. для общеобразоват. учреждений / Н.С. Пурышева, Н.Е. Важеевская, Д.А. Исаев. – Москва: Дрофа, 2012. – 255 с. – ISBN 978-5-358-11284-1.

### ***Книги четырех и более авторов***

Физика. Углубленный курс с решениями и указаниями. ЕГЭ, олимпиады, экзамены в вуз / Е.А. Вишнякова [и др.]; под ред. В.А. Макарова, С.С. Чеснокова. – 2-е изд. – Москва: БИНОМ.



Лаборатория знаний, 2014. – 414 с.: ил. – (ВМК МГУ – школе). – ISBN 978-5-9963-1821-6.

### ***Словари и энциклопедии***

Физика – увлекательная наука: энциклопедия / И.Е. Гусев. – Москва: АСТ, 2016. – 160 с. – ISBN 978-5-17-098812-9.

### ***Законодательные материалы***

Российская Федерация. Законы. Об образовании в Российской Федерации: Федеральный закон № 273-ФЗ: [принят Государственной Думой 21 дек. 2012 г.: одобрен Советом Федерации 26 дек. 2012 г.]. – Москва, 2023. – 224 с.

### ***Статьи из журналов***

Королев М.Ю. Формирование естественнонаучной картины мира у учащихся средней школы на уроках естествознания / М.Ю. Королев, Н.И. Одинцова, Е.Б. Петрова // Физика в школе. – 2023. – № 2. – С. 3–9.

### ***Электронные ресурсы***

#### ***Сайты в сети Интернет***

Образовательные ресурсы Интернета – Физика: [сайт]. – URL: [www.alleng.ru/edu/phys.htm](http://www.alleng.ru/edu/phys.htm) (дата обращения: 22.11.2022).

#### ***Статьи с сайтов***

Гудасова А.Э. Удивительные свойства воды / А.Э. Гудасова, Г.В. Михальцевич // Юный ученый. – 2023. – № 2 (65). – С. 52–55. – URL: <https://moluch.ru/young/archive/65/3364/> (дата обращения: 02.04.2023).

#### ***Книги из ЭБС***

Перинский В.В. Фонд физических законов и физико-технических эффектов: термины и понятия: словарь / В.В. Перинский, И.В. Перинская. – Саратов: Ай Пи Ар Медиа, 2020. – 84 с. – ISBN 978-5-4497-0414-6. – Текст: электронный // IPR

SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/90536.html> (дата обращения: 29.03.2023). – Режим доступа: для авторизир. пользователей. – DOI: <https://doi.org/10.23682/90536>.

Физика: словарь-справочник / Е.С. Платунов [и др.]. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2014. – 798 с. – ISBN 978-5-7422-4217-8. – Текст: электронный // IPR SMART: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/43981.html> (дата обращения: 29.03.2023). – Режим доступа: для авторизир. пользователей.

## Приложение 7

### Критерии оценивания письменных работ

Отметка	Критерии
Отлично	Даны полные ответы на все задания в соответствии с требованиями условий задач, при необходимости приведены пояснения, схемы, рисунки (выполнены карандашом/цветными карандашами и по линейке, если это необходимо)
Хорошо	В письменном ответе имеются неточности, негрубые ошибки (одна – две), которые в целом не влияют на итоговый ответ; содержание вопроса раскрыто не полностью; отсутствует пояснение (рисунки, схемы)
Удовлетворительно	В письменном ответе имеются неточности, негрубые ошибки (более двух); задания не выполнены целиком или одно из них отсутствует полностью; на уточняющие вопросы студент затрудняется дать ответ
Неудовлетворительно	Работа выполнена на низком уровне: имеются грубые ошибки при решении; отсутствует часть решения в каждом задании или задания полностью; на уточняющие вопросы по решению задач студент затрудняется дать ответ; задания не сданы в установленный срок по неуважительной причине

*Учебное издание*

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

Учебно-практическое пособие

*Составитель*

**Евгения Александровна Селезнева**

ISBN 978-5-907790-39-1

Работа рекомендована РИС университета  
Протокол № 27, 2022 г.

Издательство ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Технический редактор Т.Н. Никитенко

Источник изображений: math us! Дистанционная подготовка к олимпиадам, ДВИ и ЕГЭ по математике и физике. – URL: <https://mathus.ru/phys/index.php>.

Подписано в печать 10.07.2023 г. Формат 60×84/16

Объем 3,22 уч.-изд. л. (6,63 усл. п. л.)

Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЮУрГГПУ  
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69